



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**ANALÝZA MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ PLASTOVÝCH
DÍLŮ REALIZOVANÝCH 3D TISKEM**

ANALYSIS OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF PLASTIC PARTS REALIZED BY 3D PRINTING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Adéla Krejbychová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Vosynek, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Studentka: **Adéla Krejbychová**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Petr Vosynek, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Analýza mechanických vlastností plastových dílů realizovaných 3D tiskem

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Mechanické vlastnosti plastů používaných pro 3D technologii FDM se mohou lišit dle dodavatele, barevného pigmentu a aditiv. Nalezení vhodného materiálu s vysokými mechanickými vlastnostmi je zásadní pro použití v prototypové výrobě. Zároveň jsou stejně tak důležité procesní parametry při samotné stavbě 3D tiskem.

Cíle bakalářské práce:

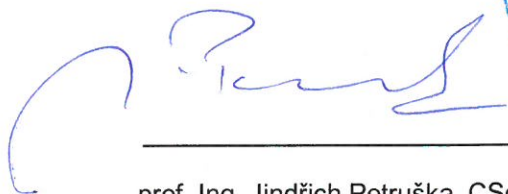
- rešeršní studie
- tvorba vzorků
- měření mechanických veličin
- zpracování a analýza naměřených veličin

Seznam literatury:

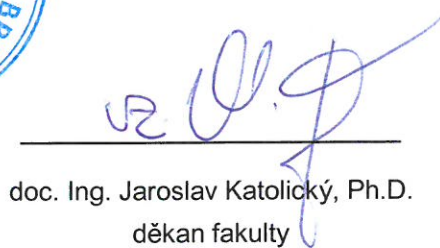
DOWLING, Norman E. Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue. 4th ed. Boston: Pearson, c2013. ISBN 01-313-9506-8.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 7. 10. 2016



prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá analýzou mechanických vlastností vzorků z materiálu PET-G vytvořených pomocí 3D tisku. Problém byl řešen experimentálně. Vzorky byly vytištěny pomocí metody tisku FDM (Fused Deposition Modeling). Měření mechanických vlastností proběhlo pomocí zkoušky tahem a naměřené veličiny byly dále statisticky analyzovány. Zkoumaný byl vliv pigmentu, výrobce materiálu a vliv nastavení procesních parametrů při samotné stavbě vzorků. Na základě vykonaných analýz bylo zjištěno, že největší vliv na výslednou pevnost v tahu měla orientace součástí při tisku. Nejlepších mechanických vlastností dosahovaly vzorky tištěné horizontálně v rovině XY s úhlem výplně 45° / - 45° od výrobce Devil Design.

KLÍČOVÁ SLOVA

materiál PET-G, 3D tisk, FDM technologie, tahová zkouška, pevnost v tahu, modul pružnosti

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the analysis of mechanical quantities of PET-G samples which were created by using 3D printing. The problem was solved experimentally. The samples were printed by using the FDM technology (Fused Deposition Modeling). Mechanical properties were measured by the tensile test and the measured quantities were further analyzed statistically. The influence of the pigment, the material manufacturer and the effect of setting the process parameters on the actual construction of the samples were investigated. On the basis of the carried out analyses it was discovered that the samples printed horizontally in the XY plane with a 45° / -45° fill angle from Devil Design had the best mechanical properties.

KEYWORDS

PET-G material, 3D printing, FDM technology, tension test, tensile strength, modulus of elasticity

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KREJBYCHOVÁ, A. *Analýza mechanických vlastností plastových dílů realizovaných 3D tiskem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 62 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Vosynek, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně pod vedením pana Ing. Petra Vosynka, Ph.D. a s využitím uvedené literatury.

V Brně dne 26. května 2017

.....

Adéla Krejbychová

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych tímto poděkovala panu Ing. Petru Vosynkovi, Ph.D. za jeho odborné rady, přátelský přístup po celou dobu vypracovávání této bakalářské práce a zpřístupnění laboratoří ÚMTMB.

Dále bych chtěla poděkovat panu doc. Ing. Davidu Palouškovi, Ph.D. za jeho cenné rady a zpřístupnění laboratoří v centru NETME. Můj velký dík patří také Josefu Březinovi za ochotnou pomoc v laboratořích. V neposlední řadě bych chtěla poděkovat své rodině a příteli za jejich podporu po celou dobu studia.

OBSAH

Úvod.....	15
Cíl práce.....	15
1. Materiál PET-G.....	16
1.1. Termoplasty.....	16
1.2. Charakteristika materiálu PET-G.....	16
1.3. Vlastnosti materiálu PET-G.....	17
1.4. Využití materiálu PET-G.....	17
2. 3D tisk.....	18
2.1. Technologie 3D tisku.....	18
2.1.1. Selective Laser Sintering SLS.....	18
2.1.2. Stereolitografie SLA.....	18
2.1.3. Metoda ZCORP.....	18
2.1.4. Laminated Object Manufacturing LOM.....	18
2.1.5. Fused Deposition Modeling FDM.....	18
2.1.6. Polyjet Matrix.....	18
2.1.7. Multijet Modeling.....	18
2.1.8. Termoplastické vstřikování s frézováním.....	18
2.1.9. Digital Light Projection.....	19
2.2. FDM technologie.....	19
2.3. 3D tiskárna.....	20
2.4. Tisk materiálu PET-G.....	21
2.5. Jiné tiskové materiály.....	22
2.5.1. Materiál PLA.....	22
2.5.2. Materiál ABS.....	22
2.5.3. Porovnání tiskových materiálů.....	23
2.6. Chyby při 3D tisku FDM technologií.....	24
2.6.1. Špatná přilnavost k podložce.....	24
2.6.2. Tvorba vláken.....	24
2.6.3. Prosakování materiálu.....	25
2.6.4. Nekonzistentní extruze.....	26

2.7.	Předpoklad chování tištěných součástí FDM metodou.....	26
3.	Analýza mechanických veličin.....	28
3.1.	Parametry tisku ovlivňující mechanické vlastnosti.....	28
3.2.	Tahová zkouška.....	31
3.2.1.	Modul pružnosti.....	32
3.2.2.	Pevnost v tahu.....	32
3.2.3.	Tvorba krčku.....	32
4.	Tvorba vzorků.....	34
4.1.	Tvar a rozměry zkušebního tělesa.....	34
4.2.	Tvar a rozměry malého zkušebního tělesa.....	35
4.3.	Druhy tvořených vzorků.....	36
4.4.	Tvorba modelu.....	38
4.5.	Převod do formátu STL.....	38
4.6.	Vytvoření GCODE formátu.....	39
4.7.	Kalibrace stavební plochy tiskárny.....	41
4.8.	Tisk vzorků.....	41
4.9.	Konečná úprava vzorků.....	43
5.	Měření mechanických veličin.....	45
5.1.	Výsledky měření.....	45
5.2.	Natřhané vzorky.....	49
6.	Vyhodnocení měření.....	51
6.1.	Statistické zpracování.....	51
6.2.	Zhodnocení výsledků.....	54
Závěr.....		55
Zdroje.....		56
Seznam použitých zkratk a symbolů.....		59
Seznam obrázků.....		61
Seznam tabulek.....		62

ÚVOD

Fused Deposition Modeling (FDM) je rychle se rozvíjející technologie 3D tisku. Tato technologie se šíří již i do domácího užívání. Většina uživatelů nastavuje parametry tisku pouze z vlastních zkušeností bez ohledu na konečné mechanické vlastnosti. Aby bylo možné předpovídat mechanické chování součástí tištěných technologií FDM, je důležité pochopit nejen samotné vlastnosti tiskového materiálu, ale také vliv procesních parametrů tisku na mechanické vlastnosti. Součásti vyrobeny FDM technologií mají anizotropní strukturu, proto má na výsledné mechanické vlastnosti vliv úhel výplně, tvar výplně, vzduchová mezera, orientace součástí při tisku a teplota tisku. Tato bakalářská práce se zabývá změnou mechanických vlastností v závislosti na nastavení úhlu výplně, tvaru výplně, orientace součástí při tisku, dále vlivem výrobce materiálu a pigmentu.

CÍL PRÁCE

Experimentální stanovení vlivu procesních parametrů, výrobce a pigmentu na mechanické vlastnosti součástí z materiálu PET-G vyrobených 3D tiskem pomocí technologie FDM.

1. MATERIÁL PET-G

1.1. Termoplasty

Materiál PET-G se řadí do skupiny termoplastů.

Termoplast je plastická hmota, která se po ohřátí nad určitou teplotu stává poddajnou či tvarovatelnou a po ochlazení se vrací zpět do pevného stavu, přičemž tyto změny tvárnosti mohou nastávat opakovaně. Termoplasty jsou polymery, tedy lineární molekuly složené do řetězců, jež jsou mezi sebou drženy prostřednictvím mezimolekulárních sil, jako jsou Van der Waalsovy síly, vodíkové můstky. Tyto síly umožňují termoplastům být opětovně tvarovány, protože mezimolekulární interakce se zvyšuje s ochlazováním a poskytuje obnovu objemových vlastností. Tímto způsobem se termoplasty liší například od termosetových polymerů neboli reaktoplastů, jejichž chemické vazby jsou v průběhu vytvrzování nevratné. Teplotní rozsah tání běžných termoplastů se pohybuje mezi 100 °C a 130 °C. Protože se termoplasty řadí mezi semi-krystalické materiály, nezměkčují se se zvyšováním teploty, místo toho zůstávají pevné, než se absorbuje dané množství tepla. Poté se rychle přemění na nízkoviskózní kapalinu. Většina termoplastů má vysokou molekulovou hmotnost. [1, 2]

Termoplasty se dále dělí na polyolefiny, fluoroplasty, vinylové plasty, akrylátové plasty, polyester, polykarbonáty, acetátové plasty a polyamidy. Tato práce je zaměřena na materiál PET-G, který spadá do skupiny polyesterů, jejichž společným znakem je přítomnost esterových vazeb v hlavním řetězci makromolekuly. Nejvýznamnější ze skupiny polyesterů jsou polyetyléntereftalát (PET) a polybutylentereftalát (PBT). [3]

1.2. Charakteristika materiálu PET-G

Materiál PET-G (celým názvem polyetyléntereftalát-glykol) je modifikovaná verze materiálu PET (polyetyléntereftalát). Modifikace je dosaženo přidáním druhého glykolu v průběhu polymerace. PET-G má tedy stejné složení jako PET, ale s přísádkou glykolu. Přidaný glykol zabraňuje nežádoucí krystalizaci, která způsobuje křehnutí standardního PET materiálu. Nový materiál je také vysoce odolný vůči nárazu. [4]

Materiál PET-G poskytuje vynikající houževnatost, chemickou odolnost a snadnou tepelnou tvárnost. Díky své nízké tvářecí teplotě lze PET-G snadno vakuově i tlakově tvářet, stejně jako tepelně, a to bez předchozího sušení materiálu. Zajímavá je také vynikající tepelná odolnost. PET-G si své mechanické vlastnosti zachovává při vysoké teplotě 120 °C, krátkodobě i při 150 °C. Je však odolný i nízkým teplotám do -70 °C, proto můžeme materiál využít i do mrazu. PET-G není toxický a je zdravotně nezávadný, lze ho použít pro styk s potravinami. Oproti materiálu PET má PET-G měkčí povrch a je tedy více náchylný k poškrábání. [5, 6]

1.3. Vlastnosti materiálu PET-G

Pevnost v tahu na mezi kluzu:	53 MPa
Modul pružnosti:	2200 MPa
Tvrdost dle Rockwella:	R115
Hustota:	1270 kg/m ³
Propustnost světla:	86 % - 91 % [7]

1.4. Využití materiálu PET-G

PET-G je vhodný pro náročné aplikace, ale také pro potisk, tvarování, ražení, ohýbání, vakuové tvarování, 3D tažení atd. Využívá se například na výrobu prototypů a maket, ortopedických a protetických pomůcek, strojních krytů, displejů a jiných. [8] Dále je využíván jako materiál pro 3D tisk.

2. 3D TISK

2.1. Technologie 3D tisku

Všechna zařízení na výrobu 3D modelů pracují na principu rozložení počítačového modelu do tenkých vrstev a jejich následnému sestavení do reálného modelu v pracovním prostoru tiskárny. Na rozdíl od klasického obrábění se materiál neubírá, ale naopak je po vrstvách přidáván. Model je stavěn na základní desce, která po dokončení každé vrstvy poklesne dolů právě o tloušťku této vrstvy. [9]

2.1.1. Selective Laser Sintering SLS

Selective Laser Sintering, je metoda 3D tisku, kde v pracovním prostoru tiskárny dochází k zapékání práškového materiálu pomocí laserového paprsku. [9]

2.1.2. Stereolitografie SLA

Tato metoda pracuje na principu vytvrzování tekutého kompozitu laserovým paprskem. [9]

2.1.3. Metoda ZCORP

Na základní desku se nanáší prášek. Prášek je spojován pojivem, jenž je vytlačován z tiskových hlav. Tato metoda je obdobou injektové tiskárny. [9]

2.1.4. Laminated Object Manufacturing LOM

Objekt je opět tvořen po vrstvách, kdy každá vrstva je vyříznuta z plastu a plošně přilepena k předchozí vrstvě. [9]

2.1.5. Fused Deposition Modeling FDM

Tryskou je v tenké vrstvě nanášen roztavený materiál. Mohou se použít dva druhy stavebního materiálu, a to modelovací a podpůrný. Existuje také metoda FDM COLOR. Pokud má tedy tiskárna více trysek, můžeme do každé vložit materiál jiné barvy, výsledný objekt může být tedy vícebarevný. [9]

2.1.6. Polyjet Matrix

Tiskovými hlavami vytlačovaný fotopolymer je vytvrzován pomocí UV lampy. I zde jsou dva stavební materiály, modelovací a podpůrný s různou teplotou tání. [9]

2.1.7. Multijet Modeling

Termoplastický materiál – vosk je vytlačován tiskovými hlavami. Opět jsou zde používány dva stavební materiály, modelovací a podpůrný s různou teplotou tání. [9]

2.1.8. Termoplastické vstřikování s frézováním

Tato metoda 3D tisku kombinuje vytlačování termoplastického materiálu (vosku) s horizontálním frézováním. [9]

2.1.9. Digital Light Projection

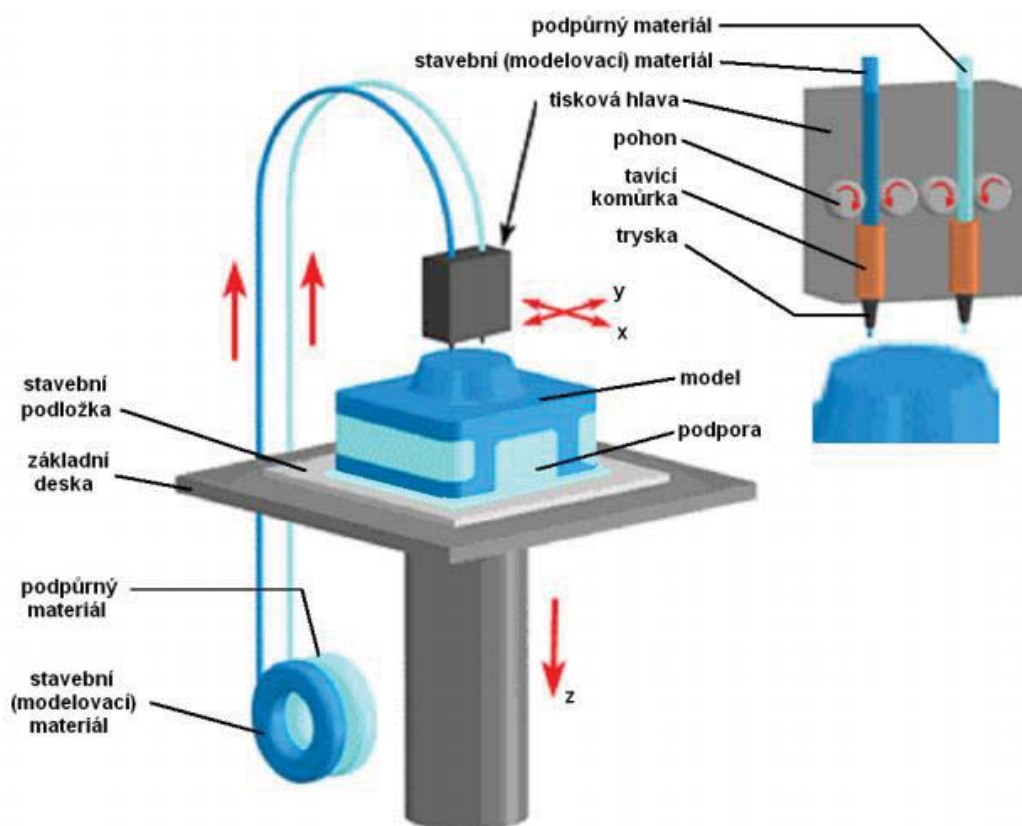
Tato technologie je založena na nasvícení fotopolymery UV projekcí modelového řezu. [9]

2.2. FDM technologie

Pro tisk vzorků této bakalářské práce je použita technologie 3D tisku Fused Deposition Modeling (FDM). Podstata této technologie je v tavení plastové struny skrze rozehrátou trysku na stavební podložku. Výška nanášené vrstvy není stejná jako šířka tlačného vlákna za tryskou, ale je dána tloušťkou trysky, ta obvykle bývá 0,4 mm. V případě složitějších tvarů výsledného objektu se používají podpurné struktury. Stavební i podpurný materiál jsou pomocí trubic dopravovány k tiskové hlavě. Tisková hlava obsahuje tavicí komůrku, kde se materiál zahřívá a přes trysku je protlačován na stavební podložku. K protlačení materiálu slouží v tiskové hlavě pohon, a to tak, že materiál tlačí směrem k trysce otáčející se ozubená kola. Na podložce okamžitě dochází ke ztuhnutí materiálu a po nanesení jedné vrstvy se stavební podložka sníží o tloušťku této vrstvy. Po dokončení tisku se výsledný výrobek ze stavební podložky odlomí, podpora může být odstraněna mechanicky nebo pomocí chemické lázně a ultrazvuku pro odplavení. Mezi základní materiály používané pro 3D tisk FDM metodou patří například ABS (Akrylonitrilbutadienstyren), PLA (Polylactic Acid), PA (Polyamid), PC (Polykarbonát), PET-G (Polyethylentereftalát - glykol) a další. [10, 11]



Obrázek 1: Nanášení materiálu metodou FDM [12]



Obrázek 2: Popis technologie FDM [13]

2.3. 3D tiskárna

Pro tisk vzorků pro tuto bakalářskou práci byla zpřístupněna tiskárna FLASHFORGE Dreamer. Tato tiskárna má dvě tiskové hlavy, tudíž umožňuje tisk se dvěma materiály pro dvoubarevný tisk. Tisk probíhá v uzavřené komoře, která izoluje vnitřní teplotu, a redukuje tak vlivy vnější teploty, která by mohla způsobovat deformace tisku. Výrobce slibuje přesnost 0,0025 mm na ose Z a 0,01 mm v rovině XY. Maximální rozměry objektu, tisknutelného na této tiskárně, jsou 231 x 150 x 140 mm. Dále je pro lepší ovladatelnost tiskárna vybavena dotykovým LCD panelem. [15]

Nejprve je v některém z grafických softwarů (například Inventor, CAD) zhotoven počítačový virtuální model. Poté je tento model převeden do formátu STL a vložen do daného počítačového programu, kde se již volí parametry tisku. Po zvolení vhodných parametrů se vše uloží ve formátu GCODE a v tomto formátu se model nahraje do tiskárny.

GCODE formát pro tuto tiskárnu se vytváří v tiskovém počítačovém softwaru FlashPrint, ve kterém se určují parametry tisku jako teplota, směr, rychlost tisku a jiné. [14]

2.5. Jiné tiskové materiály

Ostatní tiskové materiály pro tisk FDM metodou jsou ABS (Akrylonitrilbutadienstyren), PLA (Polyactic Acid), ASA (Akrylonitril-styren-akryl), PA (Polyamid), PC (Polykarbonát), Laywood a další.

V následujících podkapitolách budou popsány nejvýznamnější z nich. To slouží k porovnání s materiálem PET-G, popsaným v předešlých kapitolách.

2.5.1. Materiál PLA

Pro tisk je nejjednodušší. Výsledný model má dobrou kvalitu povrchu. Materiál měkne při nižší teplotě než například ABS nebo PET-G, proto není vhodný pro použití ve vyšších teplotách (nad 60 °C, zatímco ABS až na 100 °C), kdy se již může model deformovat. [16, 21] Materiál PLA je pro 3D tisk FDM technologií nejvyužívanějším materiálem.

Materiál PLA je biologicky odbouratelný, vyrábí se z bramborového či kukuřičného škrobu nebo z cukrové třtiny. Lze ho rozpustit v hydroxidu sodném. [23]

Doporučená teplota tisku: 190 °C – 220 °C

Doporučená teplota podložky: 0 °C – 60 °C [23]

2.5.2. Materiál ABS

Jak již bylo uvedeno, materiál ABS je odolnější vyšším teplotám než PLA. Výrobky z ABS mohou být tedy vystaveny vyšším teplotám (60 °C – 105 °C). Při tisku může docházet k deformaci modelu a také k odlupování od podložky, a to kvůli zmenšujícímu se objemu modelu při chladnutí. [16]

ABS je amorfnní termoplastický průmyslový kopolymer, je to ropný produkt, a při jeho zahřívání uniká škodlivý zápach. Materiál je odolný vůči mechanickému poškození, je tuhý, houževnatý a málo nasákavý. [24]

Doporučená teplota tisku: 220 °C – 240 °C

Doporučená teplota podložky: 90 °C – 110 °C [24]

2.5.3. Porovnání tiskových materiálů

Na obrázku 4 je znázorněno porovnání základních tiskových materiálů.

Vysvětlení pojmů z obrázku 4:

Ease of printing = jednoduchost tisku: jak snadné je tisknout daný materiál – přilnavost k podložce, maximální rychlost tisku, frekvence neúspěšných výtisků, přesnost toku, snadná dodávka do tiskárny atd.

Visual quality = vizuální kvalita: jak dobře vypadá hotový objekt

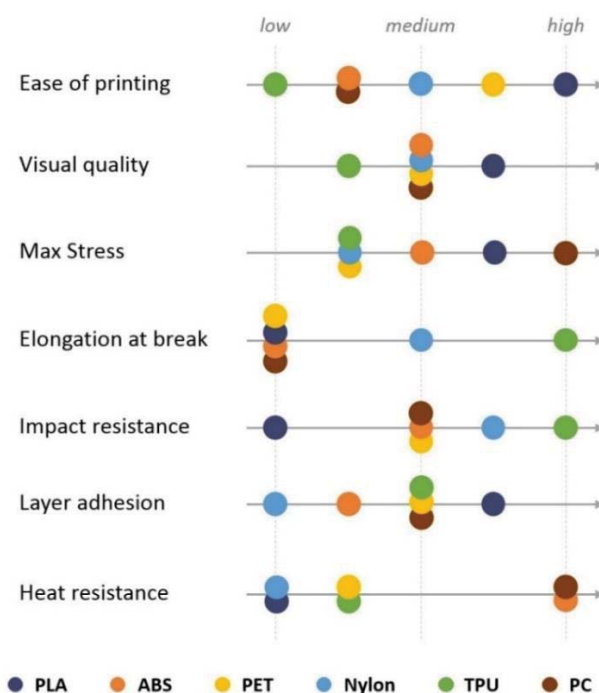
Max Stress = maximální zatížení: maximální napětí v tahu

Elongation at break = prodloužení při přetržení: maximální délka objektu před přetržením

Impact resistance = odolnost proti rázu: odolnost modelu vůči rozbití

Layer adhesion = adheze vrstev: jak dobrá adheze je mezi jednotlivými vrstvami materiálu

Heat resistance = tepelná odolnost: nejvyšší teplota před změknutím a deformací [22]



Obrázek 4: Porovnání základních tiskových materiálů pro FDM tisk [22]

Tabulka 1: Stručný přehled vlastností tiskových materiálů: [30]

Materiál	Teplota tavení Tm (°C)	Skelný přechod Tg (°C)	Pevnost v tahu Rm (MPa)	Lineární smrštění α_L ($10^{-6} K^{-1}$)
PLA	210	65	53	30
ABS	230	85	43	73,8
PET	255	60	48	59,4
PA (NYLON)	178	75	44	72
PC	280	161	68	70,2

2.6. Chyby při 3D tisku FDM technologií

Při tisku může nastat velké množství tiskových chyb, a to nedostatek materiálu na začátku tisku, špatná přilnavost k podložce, pod-extruze, nad-extruze, díry a mezery v horní vrstvě, tvorba vláken, prosakování tryskou, tečení, odskok vrstev, oddělování vrstev, vydření filamentu, ucpaná tryska, přerušená extruze uprostřed tisku, slabá výplň, kapky a hrudky, mezery mezi výplní a okrajem, vlnění rohů, jizvy na horní vrstvě, mezery v rozích, linie po stranách vytištěného modelu, vibrace, mezery v tenkých stěnách, netisknutí malých prvků, nekonzistentní extruze, deformace, špatný povrch nad podporami, rozměrová nepřesnost. [25]

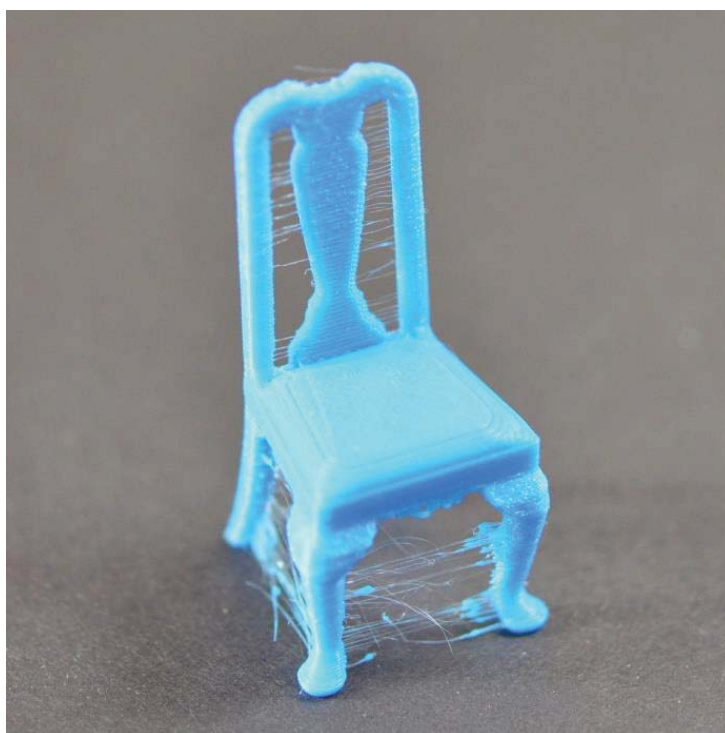
Dále budou popsány pouze ty chyby, které se vyskytly při tisku vzorků pro tuto bakalářskou práci.

2.6.1. Špatná přilnavost k podložce

Je velmi důležité, aby byla první vrstva pevně spojena s platformou, protože zbytek tisknuté součásti bude stavěn na tomto základu. [25] V tomto případě to bylo způsobeno špatnou kalibrací platformy.

2.6.2. Tvorba vláken

Tato chyba tisku se projevuje tak, že na 3D vytištěném modelu zůstávají malé řetězce (vlákna) z plastu. Tvorbu vláken způsobuje plast vytékající z trysky, zatímco extruder se přesouvá na nové místo. [25] Tato chyba byla zredukována změnou teploty, a to snížením teploty tisku o 10 °C.

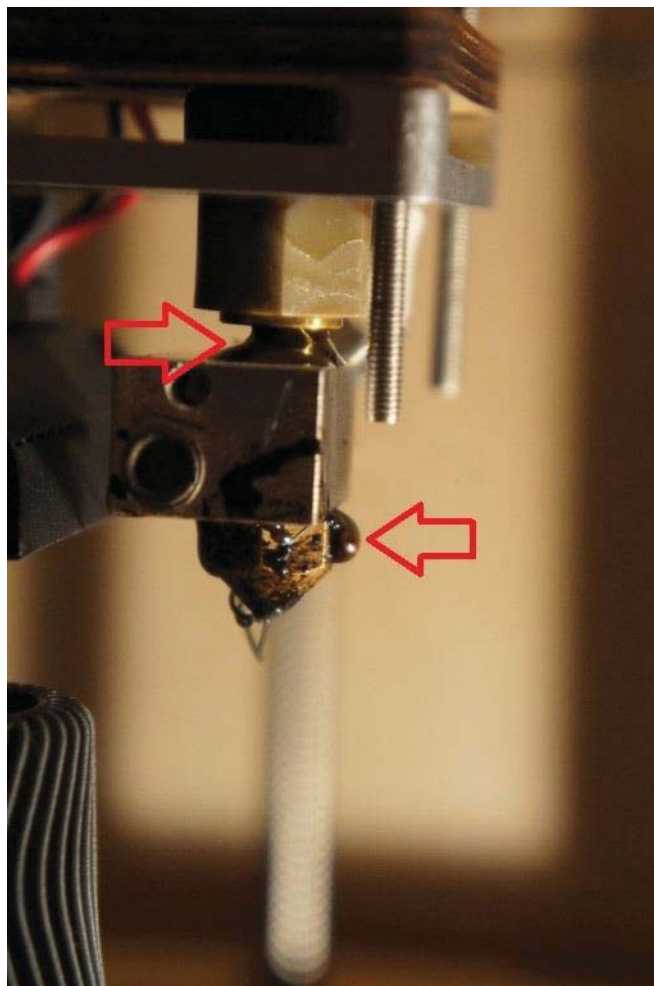


Obrázek 5: Tvoření vláken při 3D tisku [25]

2.6.3. Prosakování materiálu

Po vytištění druhého zkušebního vzorku z materiálu PET-G začal roztavený materiál přes extruder prosakovat a celá pravá tryska byla zničena. To by mohlo být způsobeno špatně nastavenými parametry tisku, přesně velmi vysokou teplotou tisku, kdy by se mohla roztavit teflonová vložka. Teplota tisku byla ale nastavena pouze na 220 °C, což je nejnižší teplota tisku, kterou pro tento materiál výrobce doporučuje. Po rozmontování a vyčištění celého extruderu bylo zjištěno, že při dřívější instalaci této tiskárny bylo zapomenuto tuto teflonovou vložku namontovat. Teflonová vložka zabraňuje roztavenému materiálu vracet se zpět nahoru do extruderu. Zaručuje tedy kvalitní tisk, méně výpadků tisku a delší životnost.

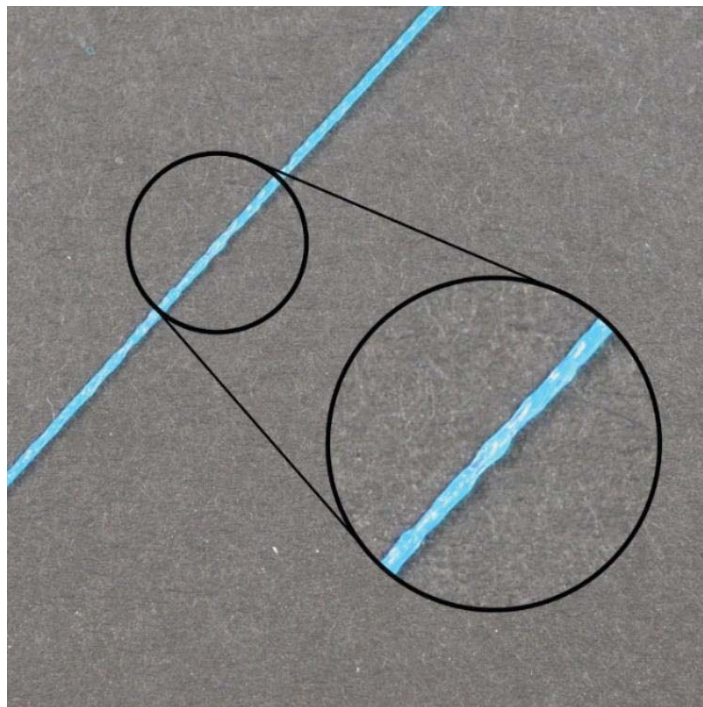
Tento problém bohužel vyřešen nebyl a následující tisky byly prováděny na trysce levé.



Obrázek 6: Prosakování materiálu extruderem [26]

2.6.4. Nekonzistentní extruze

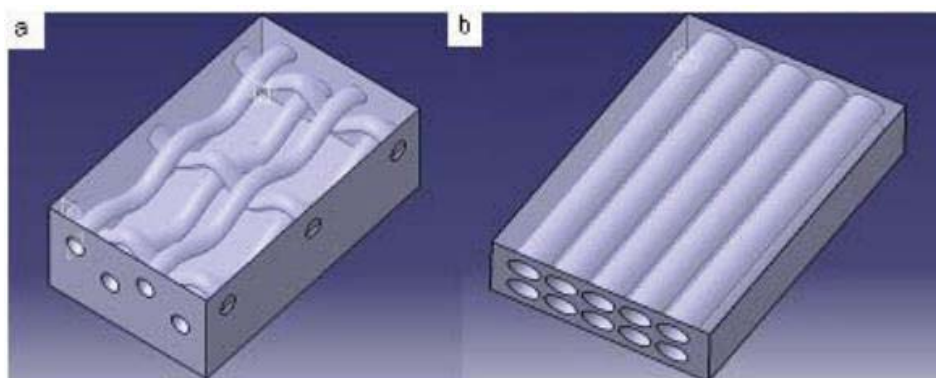
Aby tiskárna mohla vytvářet přesné součásti, musí být schopna vytlačit velmi konzistentní množství plastu. Pokud se toto vytlačování v různých částech tisku mění, ovlivní konečnou kvalitu tisku. Nekonzistentní extruze může být způsobena z různých důvodů – špatným přívodem materiálu, ucpanou tryskou, malou výškou vrstvy tisku, malou šířkou extruze nebo špatnou kvalitou filamentu. Vše vyjmenované ale bylo v pořádku, proto se musely zkontrolovat mechanické vlastnosti tiskárny. Zjistilo se znečištění podávacího kolečka a následně došlo k jeho vyčištění. [25]



Obrázek 7: Nekonzistentní extruze materiálu [25]

2.7. Předpoklad chování tištěných součástí FDM metodou

U modelů tištěných FDM metodou je důležité znát jejich chování, aby bylo možné využít je pro danou aplikaci. Předpověď jejich chování je jedním z cílů v oblasti mikromechanické vědy. V případě Rapid Prototyping by mělo být složení každé vrstvy zvažováno odlišným způsobem, než je to u jiných vrstvených kompozitů. Typické kompozitní materiály jsou tvořeny dvěma nebo více složkami (matrice a vměstky). U součástí tištěných FDM technologií je matrice představována jednotlivými vlákny a vměstky zde představují vzduchové mezery a vzduchové dutiny. U modelů tvořených FDM metodou můžeme tedy uvažovat o ortotropním případě, tedy o kontinuálních vláknech se dvěma různými směrovými vlastnostmi. [35]



Obrázek 8: a) vrstvený kompozit s obousměrným uspořádáním vláken b) vrstvený jednosměrný kompozit (jako u FDM modelu) [35]

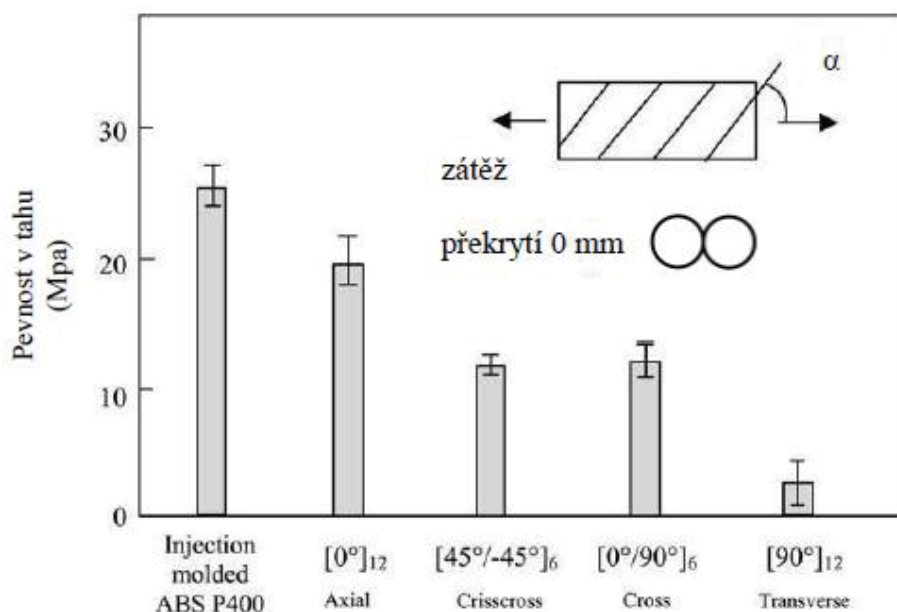
3. ANALÝZA MECHANICKÝCH VELIČIN

3.1. Parametry tisku ovlivňující mechanické vlastnosti

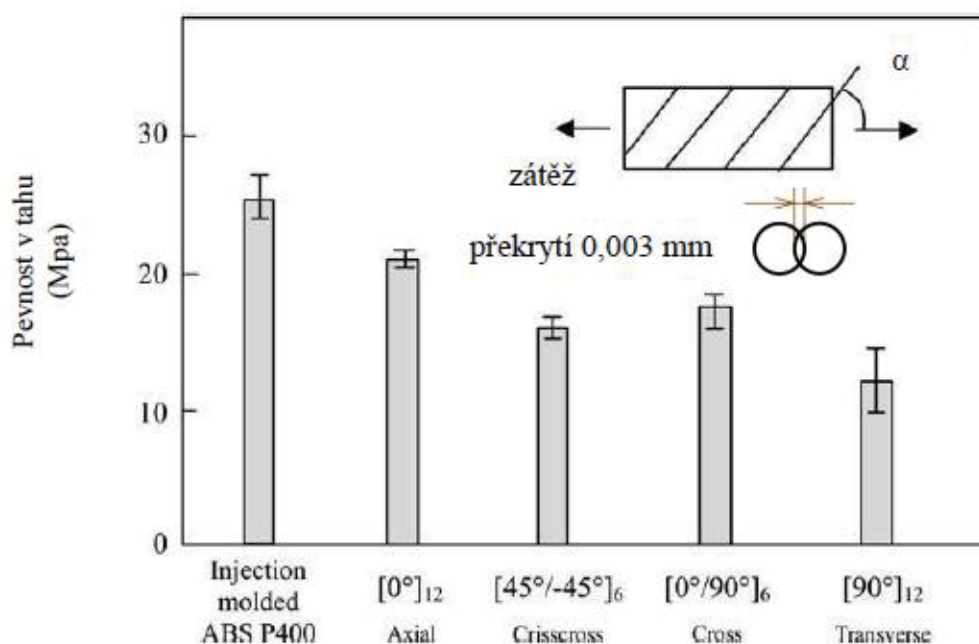
Při nastavení tisku je třeba vzít v úvahu několik parametrů, které ovlivňují mechanické vlastnosti, jako je teplota, rychlost tisku, hustota výplně, orientace součásti, směr a šířka výplně (rastru), velikost překrytí. Tyto parametry jsou většinou řešeny pouze ze zkušeností uživatele bez ohledu na mechanické vlastnosti tištěné součásti.

Na rozdíl od vstřikovaných dílů jsou součásti tištěné metodou FDM anizotropní. To znamená, že materiálová síla není jednotná ve všech směrech a rozdíl v závislosti na orientaci stavby je drastický. Pokud je požadována pevnost součásti, je nutné vytisknout ji takovým způsobem, který umožní, aby byly mechanické síly rozloženy podélně po délce vláken. [28]

Vlivem směru rastru a velikosti překrytí na napětí v tahu se experimentálně zabýval S. Ahn [31]. Výsledkem tohoto výzkumu je, že optimálním parametrem pro spojení vláken s ohledem na mechanické vlastnosti je záporná hodnota vzduchové mezery. Tato mezera má především vliv na výslednou pevnost výtisku. Na následujících obrázcích (obrázek 9 a obrázek 10) je znázorněn výsledek této studie v grafech, které předkládají porovnání pevnosti v tahu při dvou různých hodnotách překrytí (0 mm a 0,003 mm) a při různých úhlech výplně. Z těchto grafů je patrné, že vzorky tištěné metodou FDM dosahovaly nižší pevnosti v tahu než vzorky vstřikované do formy. To je způsobeno nehomogenitou ve spojení mezi vlákny. Tato nehomogenita výrazně snižuje efektivní průřez vzorků. Nejmenší pevnost v tahu měly vzorky tištěné s úhlem výplně 90°. To je způsobeno tím, že síla je přenášena pouze spoji mezi jednotlivými vlákny, a ne vlákny samotnými. Vzorky pro tento experiment byly vyrobeny z materiálu ABS P400. [30]



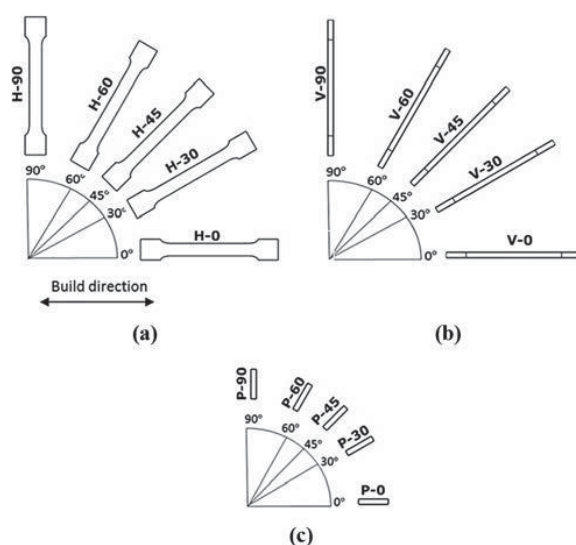
Obrázek 9: Pevnost v tahu v závislosti na směru výplně při překrytí 0 mm [30]



Obrázek 10: Pevnost v tahu v závislosti na směru výplně při překrytí 0,003 mm [30]

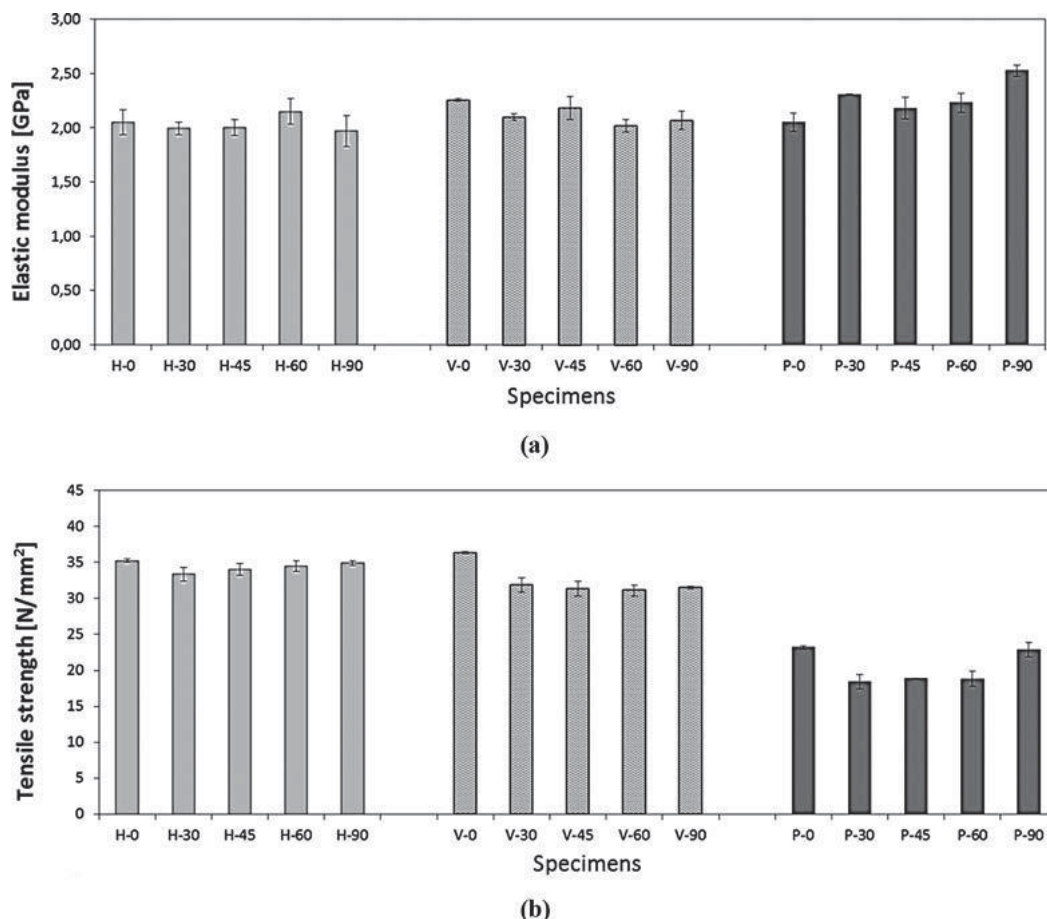
Pokud jde o orientaci dílů a jejich umístění do softwaru tiskárny, je nutno si uvědomit (zejména u součástí tisknutých metodou FDM), že existuje velký rozdíl v částečné síle v závislosti na tom, jak jsou vytištěny. Součásti STL obsahují pouze informace o geometrii povrchu, takže je nutné orientovat vzorky ručně. [28]

Účinky orientace dílu při tisku a zároveň úhlu výplně na konečnou pevnost v tahu a na modul pružnosti popisuje ve své práci I. Durgun [32]. Při experimentu pracoval s materiálem ABSplus-P430. Vzorky byly tisknuty s pěti různými úhly výplně (0°, 30°, 45°, 60° a 90°) při třech různých orientacích (horizontálně, kolmo a vertikálně).



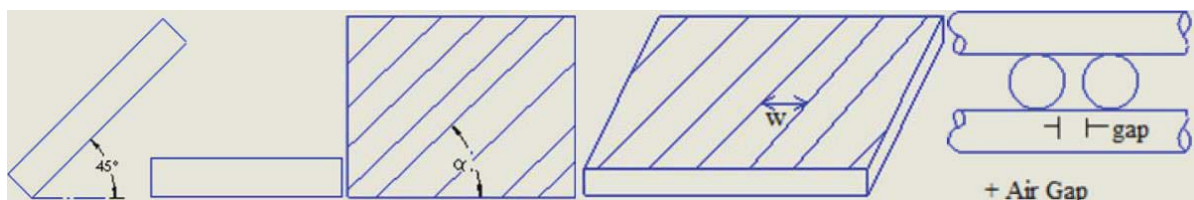
Obrázek 11: Různé úhly výplně při orientaci a) horizontální b) vertikální c) kolmé [32]

Výsledky jeho výzkumu prezentuje graf na následujícím obrázku (obrázek 12). Nejhorších výsledků pevnosti dosahovaly vzorky orientované při tisku kolmo k podložce, kdy přetržení brání pouze spoje mezi vrstvami, a největší pevnosti v tahu dosáhl vzorek tištěný v pozici vertikální s úhlem výplně 0° , kde síla působí podélně po délce vláken.



Obrázek 12: Výsledky tahové zkoušky pro dané vzorky a) modul pružnosti b) pevnost v tahu [32]

Ucelený experiment vlivů na mechanické vlastnosti vzorků provedl F. Rayegani [33]. Při tisku vzorků kombinoval různá nastavení orientace součásti (0° a 90°), úhlu (0° a 45°) a šířky výplně (0,2032 mm a 0,5588 mm) a vzduchové mezery (- 0,00254 mm a 0,5588 mm).



Obrázek 13: Nastavované parametry a) orientace součásti b) úhel výplně c) šířka výplně d) vzduchová mezera [30]

Odhadoval, že nejvyšší hodnota pevnosti v tahu bude při zátěži ve směru vláken, tedy u vzorků s úhlem výplně 0°. Experiment, jak lze vidět z následující tabulky (Tab. 2), prokázal jiné výsledky. [30,33]

Tabulka 2: Výsledky experiment: [33]

Měření číslo	Orientace součásti (°)	Úhel výplně (°)	Šířka výplně (mm)	Vzduchová mezera (mm)	Pevnost v tahu (MPa)
1	0	0	0,2032	-0,00254	34,07
2	0	0	0,2032	0,5588	6,14
3	0	0	0,5588	-0,00254	29,83
4	0	0	0,5588	0,5588	10
5	0	45	0,2032	-0,00254	38,9
6	0	45	0,2032	0,5588	4,44
7	0	45	0,5588	-0,00254	36,03
8	0	45	0,5588	0,5588	8,59
9	90	0	0,2032	-0,00254	23,94
10	90	0	0,2032	0,5588	4,29
11	90	0	0,5588	-0,00254	23,8
12	90	0	0,5588	0,5588	9,45
13	90	45	0,2032	-0,00254	21,51
14	90	45	0,2032	0,5588	3,95
15	90	45	0,5588	-0,00254	18,37
16	90	45	0,5588	0,5588	7,77

Z tabulky vyplývá, že maximální pevnost byla dosažena při měření číslo 5, tedy při orientaci vzorku 0°, úhlu výplně 45°, šířce výplně 0,2032 mm a vzduchové mezeře -0,00254 mm. Z tabulky lze také vyčíst velký vliv vzduchové mezery, kdy při kladných hodnotách vychází výsledná pevnost mnohem menší než při záporné vzduchové mezeře.

3.2. Tahová zkouška

Zkouška tahem sestává z pomalého zatěžování vzorku axiální silou, dokud se těleso nepřetrhne. Zkušební vzorky mají buď kruhový, nebo obdélníkový průřez a na obou koncích jsou obvykle rozšířené tak, aby mohl být vzorek bez problému uchycen do stroje. Vzorek je napínán konstantní rychlostí (rychlost se s časem nemění). Axiální síla, která musí být použita k dosažení této rychlosti posunu, se mění v průběhu testu. Napětí σ na vzorku pak spočítáme jako podíl zatěžující síly F_i a průřezu vzorku S . [34]

$$\sigma_i = \frac{F_i}{S} \quad [Pa] \quad (1)$$

Prodloužení je na vzorku měřeno ve střední části o délce L . Deformace ε může být vypočítaná ze změny na této délce L jako podíl změny této délky ΔL a počáteční hodnoty délky L . [34]

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$

3.2.1. Modul pružnosti

Počáteční části křivek pro různé materiály vykazují odlišné chování. V počátku namáhání vzorku se materiál chová elasticky, charakteristika namáhání tedy vykazuje lineární křivku, můžeme tedy definovat dva různé body A, B na této křivce. Pro vyšší přesnost by tyto dva body měly být co nejdále od sebe. V těchto bodech naměříme napětí σ a deformaci ε . Z naměřených hodnot můžeme vypočítat modul pružnosti neboli Youngův modul E . [34]

$$E = \frac{\sigma_B - \sigma_A}{\varepsilon_B - \varepsilon_A} \quad [Pa] \quad (3)$$

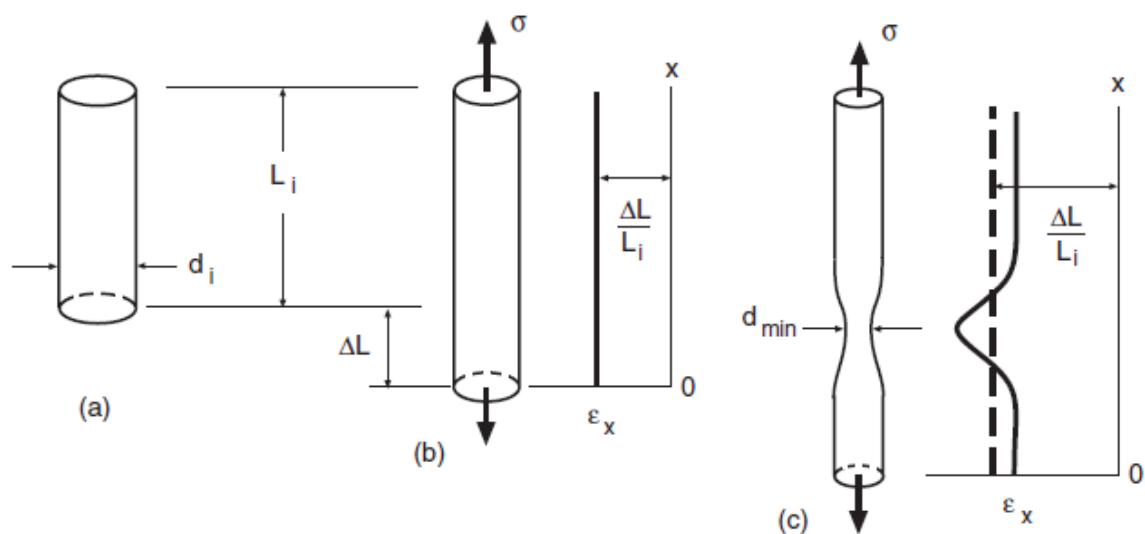
3.2.2. Pevnost v tahu

Maximální pevnost v tahu je nejvyšší dosažené napětí před porušením vzorku. Pevnost v tahu tedy vypočítáme jako podíl maximální dosažené síly F_{\max} a původního průřezu vzorku S . [34]

$$R_m = \frac{F_{\max}}{S} \quad [Pa] \quad (4)$$

3.2.3. Tvorba krčku

Pokud se při tahové zkoušce chová materiál tvárně, obvykle se vyskytne jev nazývaný krček. Deformace je zpočátku rovnoměrná, ale později se začne soustředit v jedné oblasti. To vede k tomu, že v této oblasti klesá průměr více než jinde. U tvárných kovů se začíná tvořit hrdlo v bodě maximální síly (maximálního napětí), po překročení tohoto bodu začne síla rapidně klesat. Jakmile se krček začne tvořit, přestávají platit zákony lineární napjatosti, ale zákony trojrozměrné napjatosti. [34]



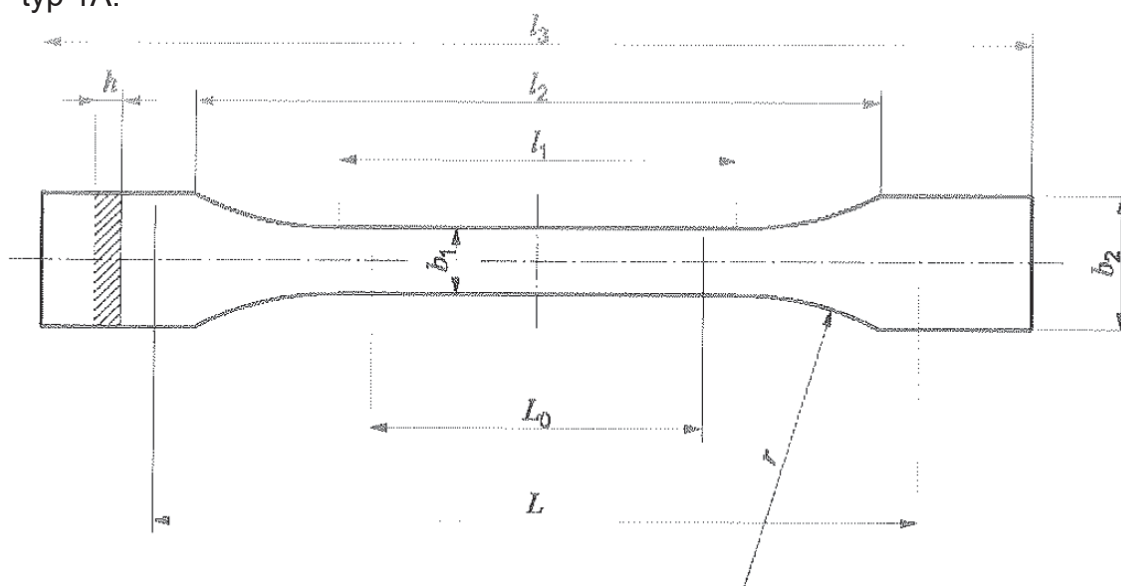
Obrázek 14: Deformace při tahové zkoušce tvárného kovu a) nezatížený vzorek b) při rovnoměrném prodlužování c) při zužování (tvorbě krčku) [34]

4. TVORBA VZORKŮ

4.1. Tvar a rozměry zkušební tělesa

Vzhledem k tomu, že neexistují žádné zvláštní normy pro RP (Rapid Prototyping) a vzorky budou mechanicky zatěžovány tahem, jsou vzorky navrženy s ohledem na geometrii a na rozměry uvedené v normě ČSN ISO 527-2. [19]

„Kdykoli je to možné, používají se zkušební tělesa tvaru oboustranných lopatek typu 1A a 1B. Typ 1A se používá pro vstřikovaná víceúčelová zkušební tělesa, typ 1B pro mechanicky obráběná zkušební tělesa.“ [19] Pro tento případ je tedy zvolen typ 1A.



Obrázek 15: Tvar zkušební tělesa [19]

	Typ zkušební tělesa	1A	1B
l_3	Celková délka ^a	170	≥ 150
l_1	Délka zúžené části s rovnoběžnými hranami	80 ± 2	$60,0 \pm 0,5$
r	Poloměr	24 ± 1	$60 \pm 0,5$
l_2	Vzdálenost mezi rozšířenými částmi s rovnoběžnými hranami ^b	$109,3 \pm 3,2$	$108 \pm 1,6$
b_2	Šířka konců	$20,0 \pm 0,2$	
b_1	Šířka zúžené části	$10,0 \pm 0,2$	
h	Doporučená tloušťka	$4,0 \pm 0,2$	
L_0	Počáteční měřená délka (preferovaná)	$75,0 \pm 0,5$	$50,0 \pm 0,5$
	Počáteční měřená délka (přípustná, jestliže se požaduje pro řízení kvality nebo když je předepsána)	$50,0 \pm 0,5$	
L	Počáteční vzdálenost mezi čelistmi	115 ± 1	115 ± 1

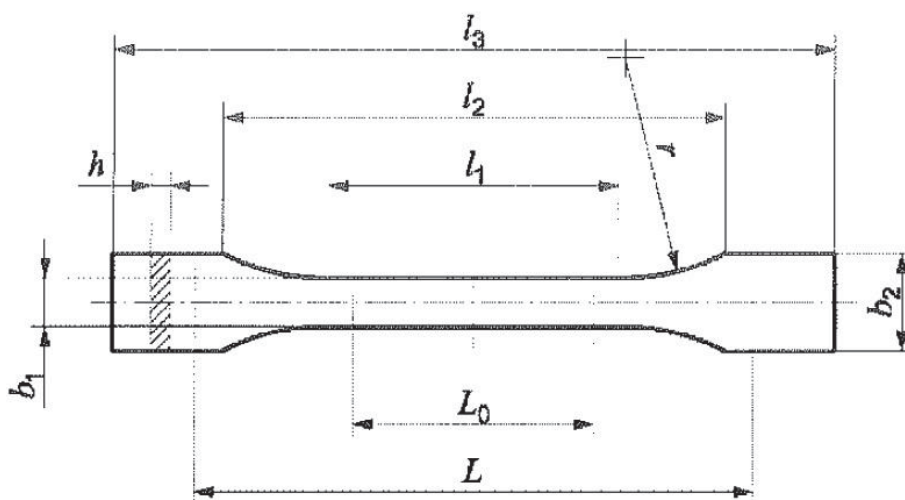
^a Doporučená celková délka 170 mm pro typ 1A je v souladu s ISO 294-1 a ISO 10724-1. U některých materiálů smí být délka lopatek prodloužena (např. $l_3 = 200$ mm), aby se zabránilo porušení nebo prokluzování tělesa v upínacích čelistech zkušebního stroje.

^b $l_2 = l_1 + [4r(b_2 - b_1) - (b_2 - b_1)^2]^{1/2}$, pro l_1 , r , b_1 a b_2 , musí však být v určených mezích.

Obrázek 16: Rozměry zkušební tělesa [19]

4.2. Tvar a rozměry malého zkušební tělesa

Pracovní prostor tiskárny FLASHFORGE Dreamer v ose Z je 140 mm a zkušební těleso typu 1A má délku 170 mm. Při tvorbě vzorků na výšku by se tedy zkušební těleso typu 1A do pracovního prostoru tiskárny nevešlo a musí být použita menší zkušební tělesa. Norma ČSN ISO 527-2 [19] říká, že pokud je z jakéhokoli důvodu nemožné použít standardní zkušební těleso typu 1, je možné použít zkušební tělesa typu 1BA nebo 1BB. Pro tuto bakalářskou práci je zvolen typ malého zkušební tělesa 1BA.



Obrázek 17: Tvar malého zkušební tělesa [19]

Rozměry v milimetrech

	Typ zkušební tělesa	1BA	1BB
l_3	Celková délka	≥ 75	≥ 30
l_1	Délka zúžené části s rovnoběžnými hranami	$30,0 \pm 0,5$	$12,0 \pm 0,5$
r	Poloměr	≥ 30	≥ 12
l_2	Vzdálenost mezi rozšířenými částmi s rovnoběžnými hranami	58 ± 2	23 ± 2
b_2	Šířka konců	$10,0 \pm 0,5$	$4 \pm 0,2$
b_1	Šířka zúžené části	$5,0 \pm 0,5$	$2,0 \pm 0,2$
h	Tloušťka	≥ 2	≥ 2
L_0	Počáteční měřená délka	$25,0 \pm 0,5$	$10,0 \pm 0,2$
L	Počáteční vzdálenost mezi čelistmi	$l_2^{-2} \substack{+2 \\ 0}$	$l_2^{+1} \substack{+1 \\ 0}$

POZNÁMKA Zkušební tělesa typu 1BA a 1BB jsou tvarově úměrná typu 1B, s poměrem zmenšení 1:2 popř. 1:5, s výjimkou tloušťky.

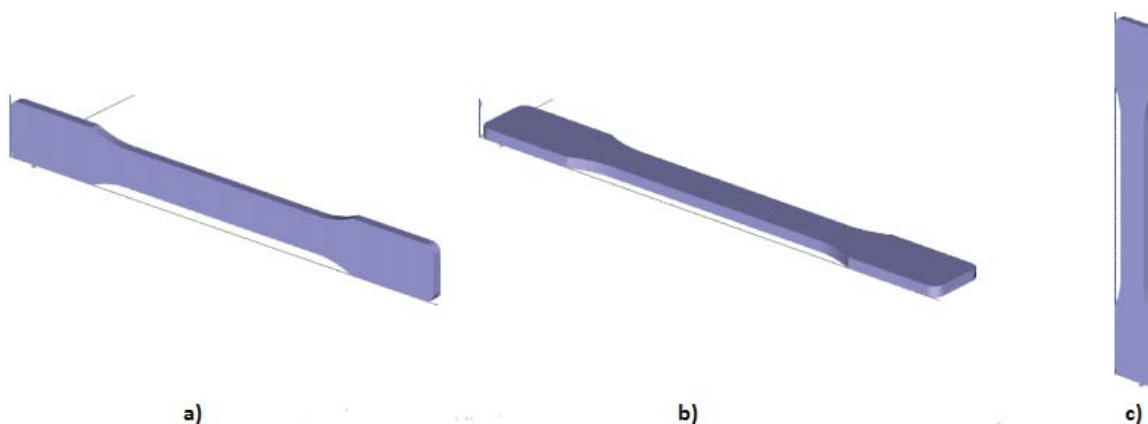
Obrázek 18: Rozměry malého zkušební tělesa [19]

4.3. Druhy tvořených vzorků

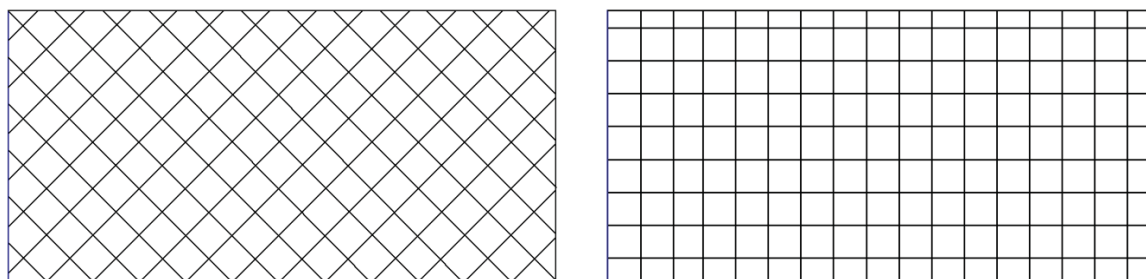
Vzorky byly tištěny z materiálu PET-G od dvou výrobců, a to výrobce Devil Design (dále DD) a výrobce Plasty Mladeč (dále PM). Od každého výrobce byly k dispozici dva druhy tiskových strun lišící se barvou. Od výrobce DD je to materiál transparentní bezbarvý (dále NAT) a materiál transparentní rubínově červený (dále RR) a od výrobce PM také materiál transparentní bezbarvý (dále NAT) a materiál transparentní modrý (dále BL). Všechny tyto materiály mají průměr tiskové struny 1,75 mm, tak aby byly kompatibilní s tiskárnou.

Od obou výrobců byly tvořeny stejné sady vzorků tak, abychom v závěru mohli tyto dva výrobce vzájemně porovnat. Dále byly vzorky navrhovány tak, aby mohl být posouzen vliv orientace tištěné součásti, úhel rastru a vliv pigmentu na mechanické vlastnosti. Všechny vzorky byly tvořeny se 100 % hustotou výplně, aby se co nejvíce podobaly vstřikovaným součástem. V praxi se nejběžněji používá hexagonální (šestiúhelníkový) rastr, s menší procentuální výplní kvůli úspoře materiálu. Proto byly ještě od každého výrobce vytištěny vzorky s hexagonálním rastrem a 50 % hustotou výplně.

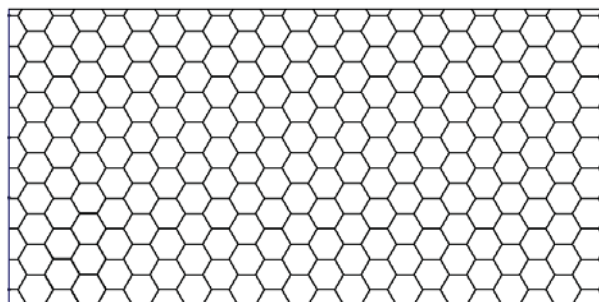
Od každého druhu navržených vzorků bylo vytvořeno 5 stejných kusů, aby bylo možno v závěru vše statisticky posoudit.



Obrázek 19: Orientace součásti a) XZ horizontálně b) XY horizontálně c) XZ vertikálně [28]



Obrázek 20: Liniová výplň pod úhlem $[45^\circ / -45^\circ]$ a $[0^\circ / 90^\circ]$



Obrázek 21: Hexagonální výplň

Tabulka 3: Seznam tvořených vzorků:

Sada	Výrobce	Barva	Tvar výplně	Úhel rastru	Orientace součásti	Hustota výplně
1.	DD	NAT	linie	45° / -45°	XY horizontálně	100 %
2.	DD	RR	linie	45° / -45°	XY horizontálně	100 %
3.	DD	RR	linie	45° / -45°	XZ horizontálně	100 %
4.	DD	RR	linie	45° / -45°	XZ vertikálně	100 %
5.	DD	RR	linie	0° / 90°	XY horizontálně	100 %
6.	DD	RR	hexagon	-	XY horizontálně	50 %
7.	PM	NAT	linie	45° / -45°	XY horizontálně	100 %
8.	PM	BL	linie	45° / -45°	XY horizontálně	100 %
9.	PM	BL	linie	45° / -45°	XZ horizontálně	100 %
10.	PM	BL	linie	45° / -45°	XZ vertikálně	100 %
11.	PM	BL	linie	0° / 90°	XY horizontálně	100 %
12.	PM	BL	hexagon	-	XY horizontálně	50 %

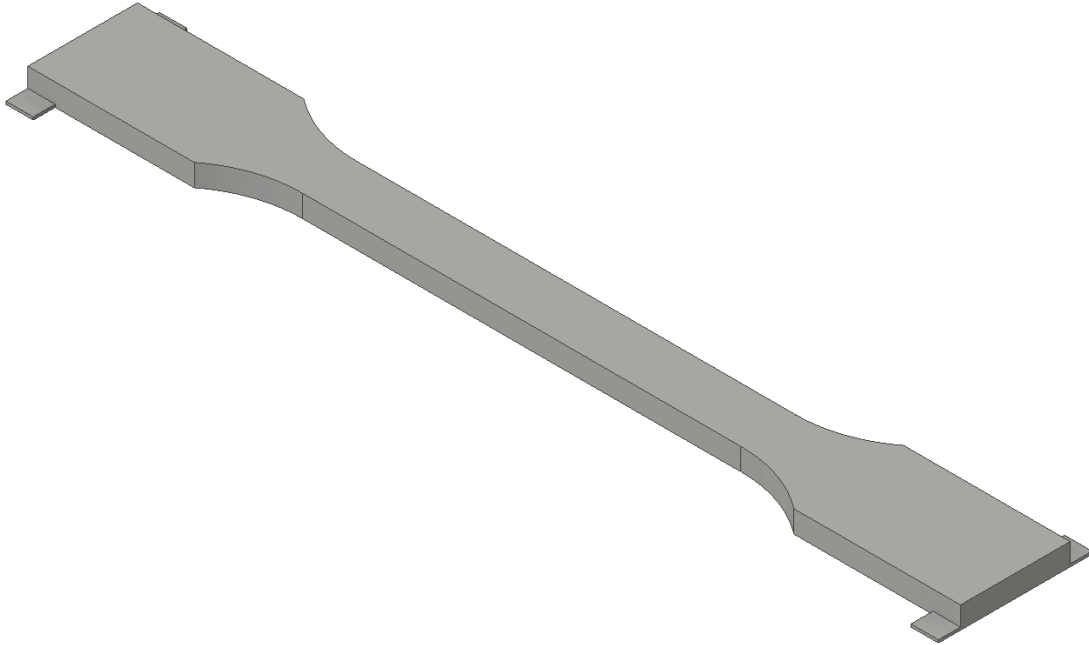
Dohromady tedy bylo vytvořeno 12 x 5 = 60 vzorků.

Zkratky pro jednotlivé sady vzorků používané v další části bakalářské práce:

1. sada – DD_NAT_45x45_XY
2. sada – DD_RR_45x45_XY
3. sada – DD_RR_45x45_XZh
4. sada – DD_RR_45x45_XZv
5. sada – DD_RR_0x90_XY
6. sada – DD_RR_hex
7. sada – PM_NAT_45x45_XY
8. sada – PM_BL_45x45_XY
9. sada – PM_BL_45x45_XZh
10. sada – PM_BL_45x45_XZv
11. sada – PM_BL_0x90_XY
12. sada – PM_BL_hex

4.4. Tvorba modelu

Model byl vytvořen v programu Autodesk Inventor. Při modelování testovacího vzorku byly v programu k vzorku navíc preventivně přidány čtyři patky pro zabránění průhybu vzorku při samotném tisku. Tyto patky také zjednodušovaly odstraňování vzorků od stavební desky po tisku.



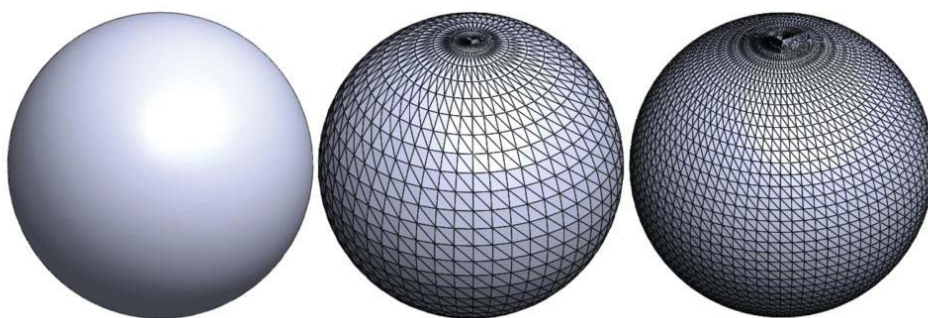
Obrázek 22: Vytvořený model vzorku v programu Autodesk Inventor

4.5. Převod do formátu STL

Po vytvoření modelu musel být model převeden do formátu STL, který je kompatibilní s programem FlashPrint.

STL formát využívá triangulaci povrchu 3D modelu. Tento proces převodu modelu na STL je standardní algoritmus povrchové triangulace, často používá v analýze konečných prvků. Formát STL obsahuje seznam ploch, rovinné trojúhelníky, kde každý trojúhelník je popsán třemi jedinečnými vrcholy (souřadnice x , y , z) a vektorem kolmým na tento trojúhelník a směřujícím k vnějšímu povrchu modelu. [20]

Soubory STL mohou být použity téměř u každé 3D tiskárny nebo CAD programu. Vzhledem k tomu, že formát souboru STL popisuje geometrické údaje, je snadné změnit velikost 3D objektu. STL soubory jsou omezeny pouze na popis geometrie povrchu jednosměrného objektu. Neexistuje žádné zobrazování barev, textury, materiálu, spodní konstrukce nebo jiných atributů, které se obvykle nacházejí v jiných formátech CAD modelů. [4]



Obrázek 23: Model koule převeden do STL formátu [29]

4.6. Vytvoření GCODE formátu

Součásti ve formátu STL byly vloženy do programu FlashPrint, vytvořeného speciálně pro tiskárny FLASHFORGE. Aby mohla být provedena statistická analýza, bylo od každé sady vzorků vytvořeno 5 kusů. Sady jednotlivých vzorků se tiskly najednou, aby měly všechny vzorky stejné okolní podmínky, jako je například teplota nebo vlhkost vzduchu.

Parametry tisku:	Teplota extruderu:	220 °C
	Teplota platformy:	65 °C
	Tloušťka tištěné vrstvy:	0,18 mm
	Tloušťka první vrstvy:	0,27 mm
	Rychlost tisku:	60 mm/s
	Tvar výplně:	linie / hexagon
	Hustota výplně:	100 % / 50%
	Úhel rastru:	[45° / -45°] / [0° / 90°]

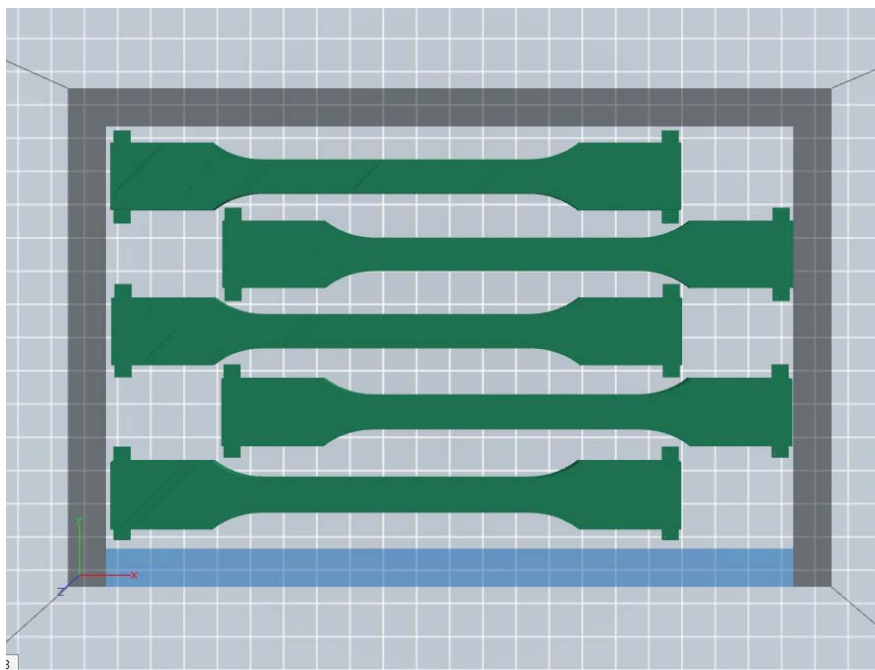
Tabulka 4: Přehled spotřeby materiálu a doby tisku:

Sada vzorků č.	Doba tisku	Spotřeba materiálu [m]
1 ; 7	3 hodiny 7 minut	25,16
2 ; 8	3 hodiny 7 minut	25,16
3 + 4 ; 9 + 10	7 hodin 32 minut	32,04
5 ; 11	5 hodin 5 minut	24,61
6 ; 12	3 hodiny 31 minut	19,31

Od každého výrobce bylo tedy spotřebováno 126,28 metrů materiálu. A celková doba tisku byla 44 hodin 24 minut.

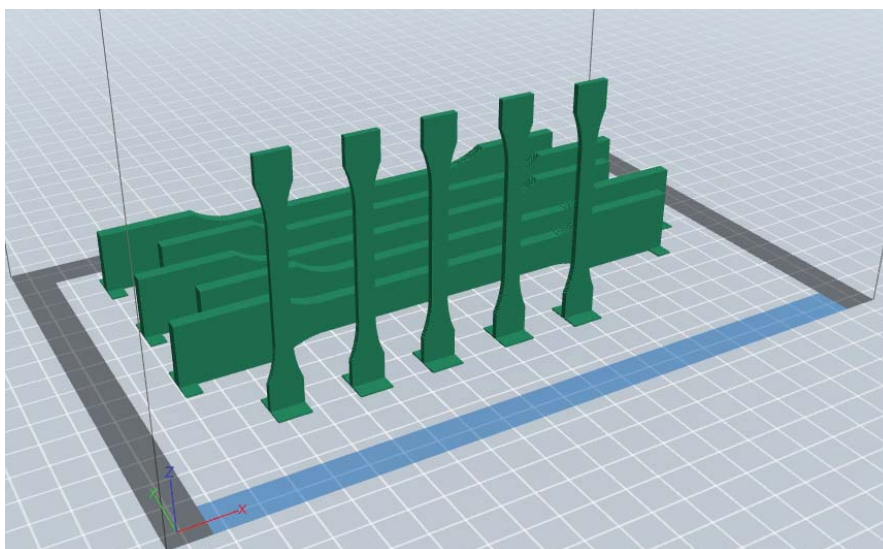
Tabulka 5: Počet tiskových vrstev

Orientace součásti	Počet vrstev
XY horizontálně	23
XZ horizontálně	112
XZ vertikálně	417



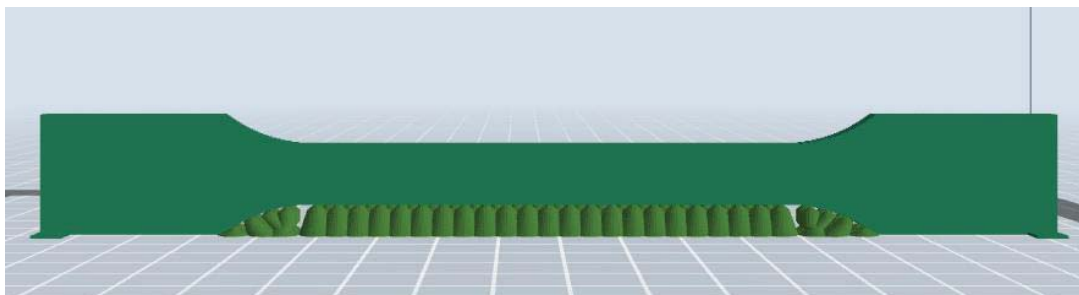
Obrázek 24: GCODE soubor pro vzorky tištěné v rovině XY

Vzorky tištěné v rovině XZ byly vloženy do jednoho GCODE souboru z důvodu úspory času.

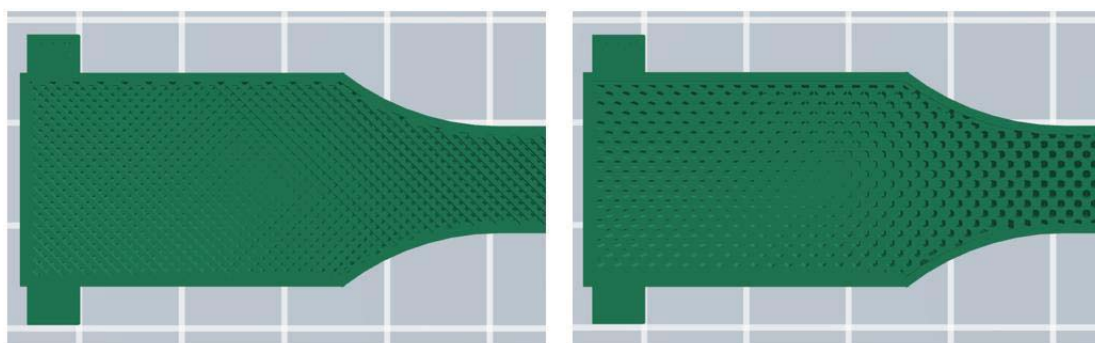


Obrázek 25: GCODE soubor pro vzorky tištěné v rovině XZ

U vzorků tištěných v rovině XZ horizontálně se musely přidat podpory, aby nedošlo ke zborcení vzorku během tisku.



Obrázek 26: Vytvořené podpory u vzorku tištěného v rovině XZ horizontálně



Obrázek 27: Porovnání mezi liniovým a hexagonálním rastrem s 50 % hustotou výplně

4.7. Kalibrace stavební plochy tiskárny

Před samotným tiskem se pro co nejvyšší přesnost tištěných dílů musela provést kalibrace stavební plochy, aby mezi tryskou a stavební plochou byla ideální mezera. Při nesprávné kalibraci může být tato mezera malá, to se může projevit v nesouměrnosti první vrstvy, hůře to může poškodit podávací kolečka v tiskové hlavě tiskárny. Pokud je tato mezera velká, nedochází ke správnému přichycení první vrstvy k podložce.

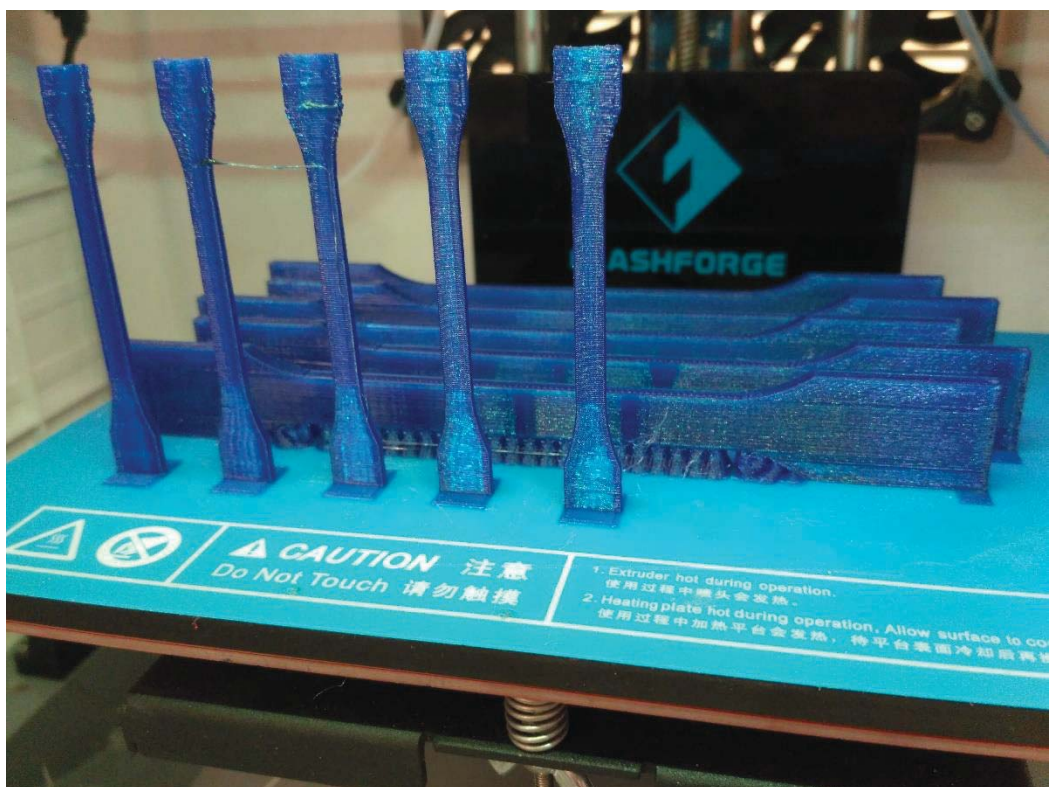
V praxi se pro kontrolu této mezery využívá silnější papír, např. vizitka. V nastavení tiskárny se zvolí možnost Level, poté tryska postupně najíždí do tří bodů ke stavební podložce. Pokaždé, když tryska najede do jednoho z těchto bodů, vložíme mezi trysku a podložku již zmíněnou vizitku. Při posouvání vizitky v tomto bodě musí vizitka vyvíjet menší odpor. V případě, že vizitka neklade žádný odpor, nebo naopak velký odpor, musíme manuálně stavební plochu seřídít pomocí tří šroubů nacházejících se zespodu podložky, aby mezera byla ideální.

4.8. Tisk vzorků

Tisk vzorků probíhal v laboratořích 3D tisku v centru NETME. Jak již bylo uvedeno, tisk všech vzorků trval 44 hodin a 24 minut a celkově bylo spotřebováno 252,56 metrů tiskové struny.



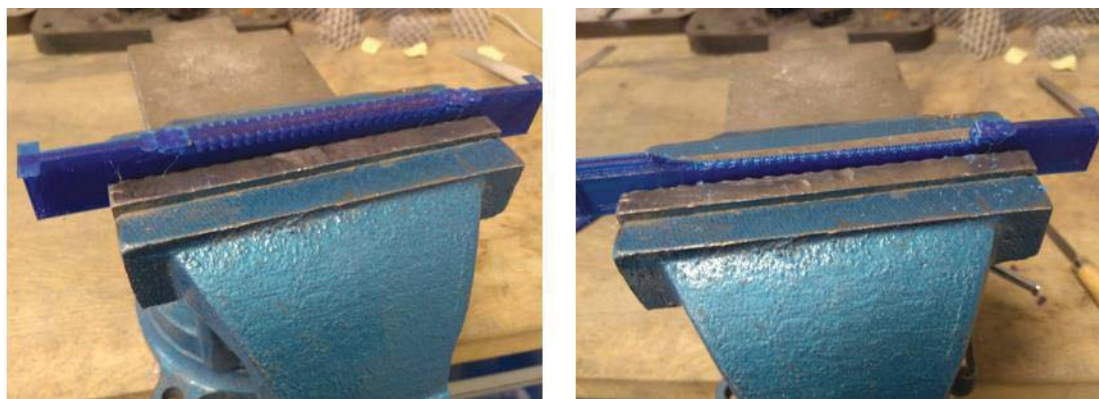
Obrázek 28: Vytištěná sada vzorků č. 6



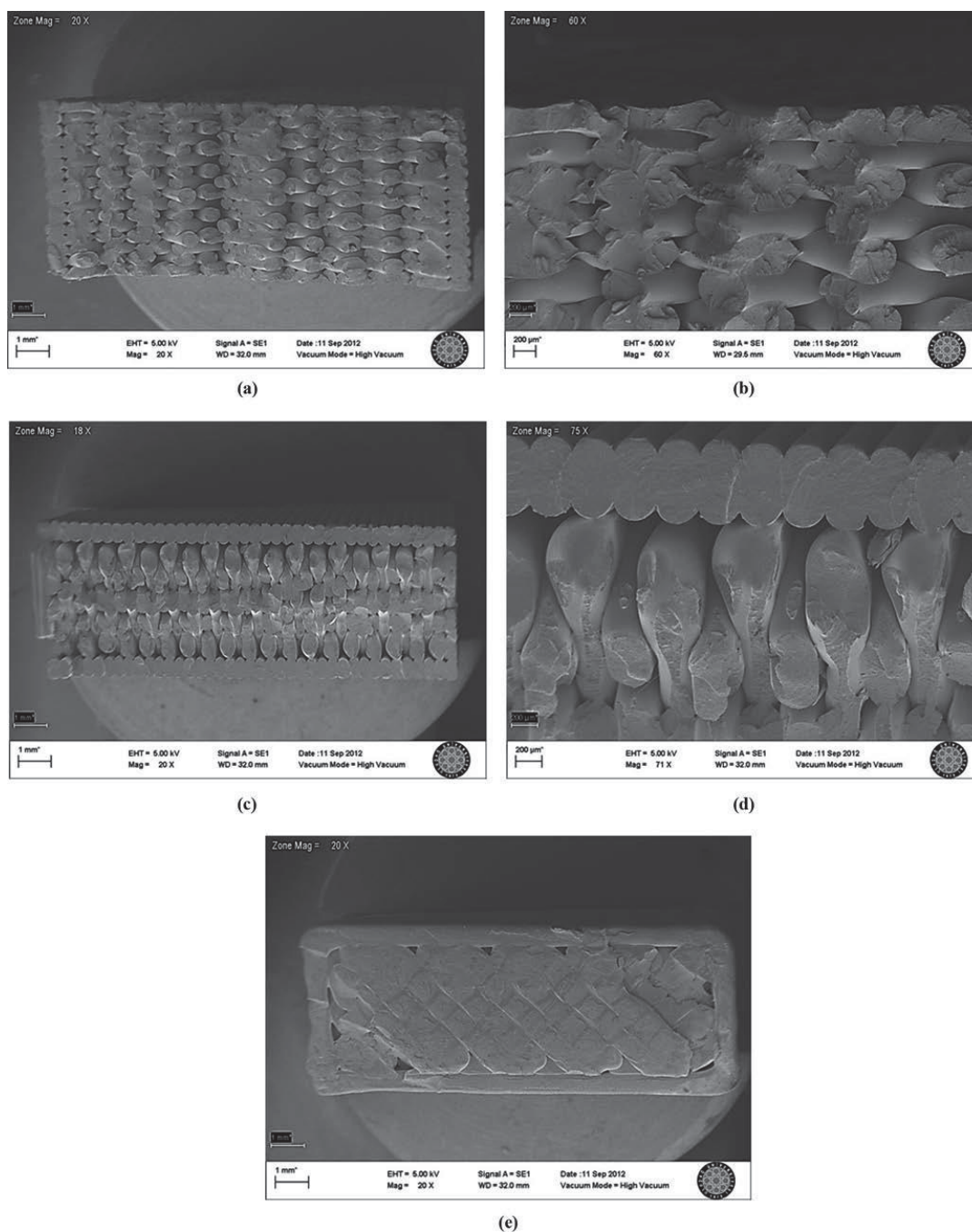
Obrázek 29: Vytištěné sady vzorků č. 9 a č. 10

4.9. Konečná úprava vzorků

Vytištěné vzorky prošly finální úpravou. Štípacími kleštěmi byly odstraněny průhybu zabraňující patky, podpory byly ze vzorků odbroušeny a odlomeny, dále byly odstraněny drobné vady tisku.



Obrázek 30: Odstraňování podpor



Obrázek 31: Řez vzorkem tištěného a) v rovině XY b) v rovině XY – detailnější pohled c) v rovině XZ horizontálně d) v rovině XZ horizontálně – detailnější pohled e) v rovině XZ vertikálně [32]

5. MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VELIČIN

Měření mechanických veličin vzorků bylo provedeno pomocí tahové zkoušky. Pro měření bylo použito 60 vzorků, 5 vzorků z 12 sad. Pro lepší přehlednost vzorků byl před začátkem měření označen číslem 1 – 5 vzorek z každé sady. Měření probíhalo dohromady ve třech dnech. Trhání vzorků bylo provedeno na zkušebním stroji od firmy Zwick se siloměrnou hlavou 22 kN v laboratořích ÚMTMB. Zatěžování vzorků probíhalo při rychlosti 3 mm/min. Měřena byla síla do přetržení nebo do vytvoření krčku. Z maximální síly byla spočítána pevnost v tahu a ze závislosti napětí na přetvoření (poměrném prodloužení) byl regresí vypočten modul v tahu.

5.1. Výsledky měření

Pro každý z pěti vzorků ze sady byla určena pevnost v tahu R_m . Z těchto pěti hodnot pevností v tahu byla určena průměrná hodnota, směrodatná odchylka a medián. Výsledky těchto hodnot můžeme vidět v následující tabulce (Tab. 6).

Tabulka 6: Aritmetický průměr, směrodatná odchylka, medián pro hodnoty pevnosti v tahu:

Sada vzorků	Průměr \bar{x} (MPa)	Směrodatná odchylka s	Medián Me (MPa)
DD_NAT_45x45_XY	55,68	0,84	55,52
DD_RR_45x45_XY	53,98	0,91	54,28
DD_RR_45x45_XZh	33,57	4,32	35,10
DD_RR_45x45_XZv	19,98	3,46	18,99
DD_RR_0x90_XY	47,70	1,34	47,67
DD_RR_hex	23,62	2,16	23,88
PM_NAT_45x45_XY	46,72	0,90	47,11
PM_BL_45x45_XY	40,68	3,48	42,95
PM_BL_45x45_XZh	39,06	3,89	38,80
PM_BL_45x45_XZv	18,23	3,53	18,99
PM_BL_0x90_XY	44,51	4,62	47,23
PM_BL_hex	23,76	1,18	23,57

Při tisku součástí pomocí FDM dochází k malé deformaci modelů. Předchozí hodnoty pevnosti jsou počítány s normalizovanou hodnotou průřezu vzorku, tedy 10 x 4 mm. Proto je nutné hodnoty pevnosti v tahu přepočítat pro skutečné průřezové hodnoty. Skutečné průřezové hodnoty vzorků jsou 10,1 x 4,1 mm. To neplatí pro vzorky tištěné vertikálně (vzorky malé), u těchto vzorků byly při trhání zadávány již skutečné hodnoty průřezu, a v předchozí tabulce (Tab. 6) jsou tedy tyto hodnoty správně.

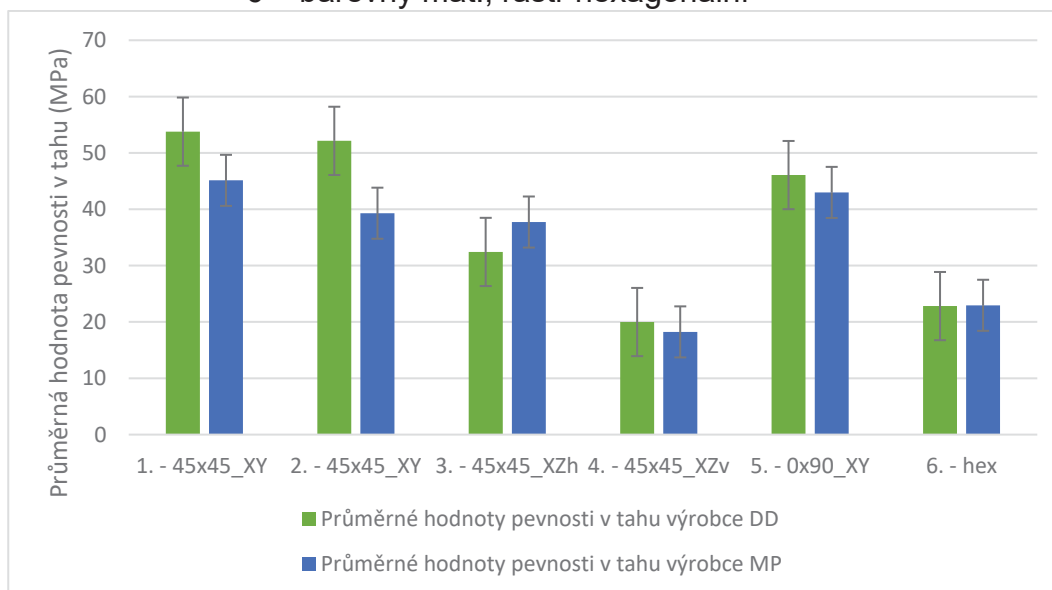
Tabulka 7: Aritmetický průměr a medián pevnosti v tahu pro skutečné průřezové hodnoty:

Sada vzorků	Průměr \bar{x} (MPa)	Medián Me (MPa)
DD_NAT_45x45_XY	53,78	53,63
DD_RR_45x45_XY	52,15	52,43
DD_RR_45x45_XZh	32,43	33,90
DD_RR_45x45_XZv	19,98	18,99
DD_RR_0x90_XY	46,07	46,05
DD_RR_hex	22,81	23,07
PM_NAT_45x45_XY	45,13	45,51
PM_BL_45x45_XY	39,30	41,49
PM_BL_45x45_XZh	37,73	37,48
PM_BL_45x45_XZv	18,23	18,99
PM_BL_0x90_XY	42,99	45,62
PM_BL_hex	22,95	22,77

V následujícím sloupcovém grafu (obrázek 32) můžeme vidět porovnání mezi výrobci. Každý sloupec představuje průměrnou hodnotu pevnosti v tahu pro všechny sady vzorků. Zelené sloupce představují výrobce Devil Design a modré sloupce výrobce Plasty Mladeč. Vedle sebe jsou vždy vzorky se stejnými parametry tisku.

Označení jednotlivých sloupců:

- 1 – průhledný materiál, rastr 45° / -45°, rovina tisku XY
- 2 – barevný materiál, rastr 45° / -45°, rovina tisku XY
- 3 – barevný mat., rastr 45° / -45°, rovina tisku XZ horizontálně
- 4 – barevný mat., rastr 45° / -45°, rovina tisku XZ vertikálně
- 5 – barevný mat., rastr 0° / 90°, rovina tisku XY
- 6 – barevný mat., rastr hexagonální



Obrázek 32: Graf porovnávající pevnost v tahu mezi DD a PM

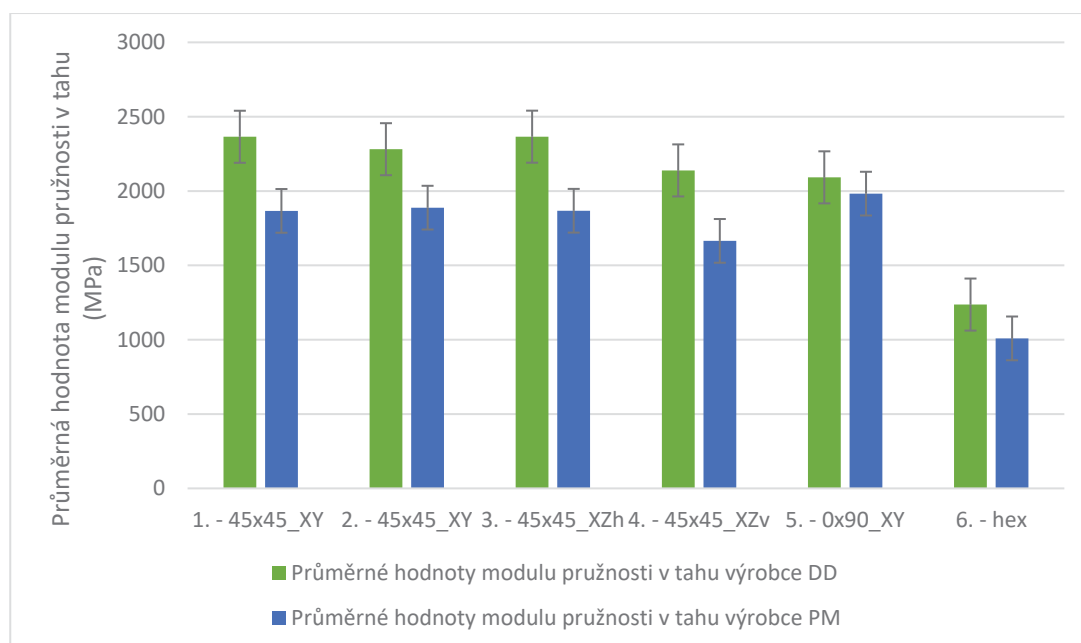
Další měřenou veličinou byl modul pružnosti v tahu E. Ten se počítal z intervalu síly <0,500>, kde křivka vykazovala lineární (elastickou) charakteristiku.

V následující tabulce (Tab. 8) je zobrazen aritmetický průměr, směrodatná odchylka a medián modulu v tahu pro každou sadu.

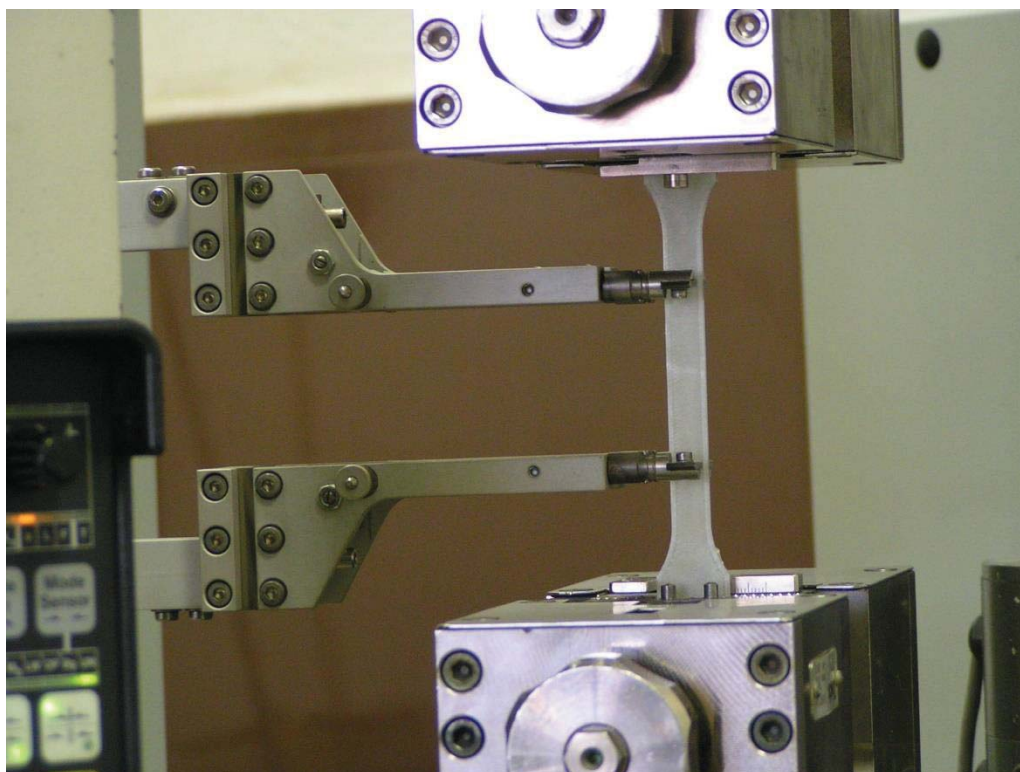
Tabulka 8: Aritmetický průměr, směrodatná odchylka a medián pro hodnoty modulu:

Sada vzorků	Průměr \bar{x} (MPa)	Směrodatná odchylka s	Medián Me (MPa)
DD_NAT_45x45_XY	2364,97	88,99	2315,61
DD_RR_45x45_XY	2281,33	39,59	2288,59
DD_RR_45x45_XZh	2365,62	110,23	2414,11
DD_RR_45x45_XZv	2138,62	522,41	2045,16
DD_RR_0x90_XY	2092,07	52,29	2106,83
DD_RR_hex	1236,30	108,17	1294,35
PM_NAT_45x45_XY	1866,55	95,55	1895,59
PM_BL_45x45_XY	1888,17	66,93	1911,52
PM_BL_45x45_XZh	1867,33	109,47	1891,34
PM_BL_45x45_XZv	1664,73	84,97	1643,07
PM_BL_0x90_XY	1982,56	110,08	2039,96
PM_BL_hex	1008,88	61,63	1017,85

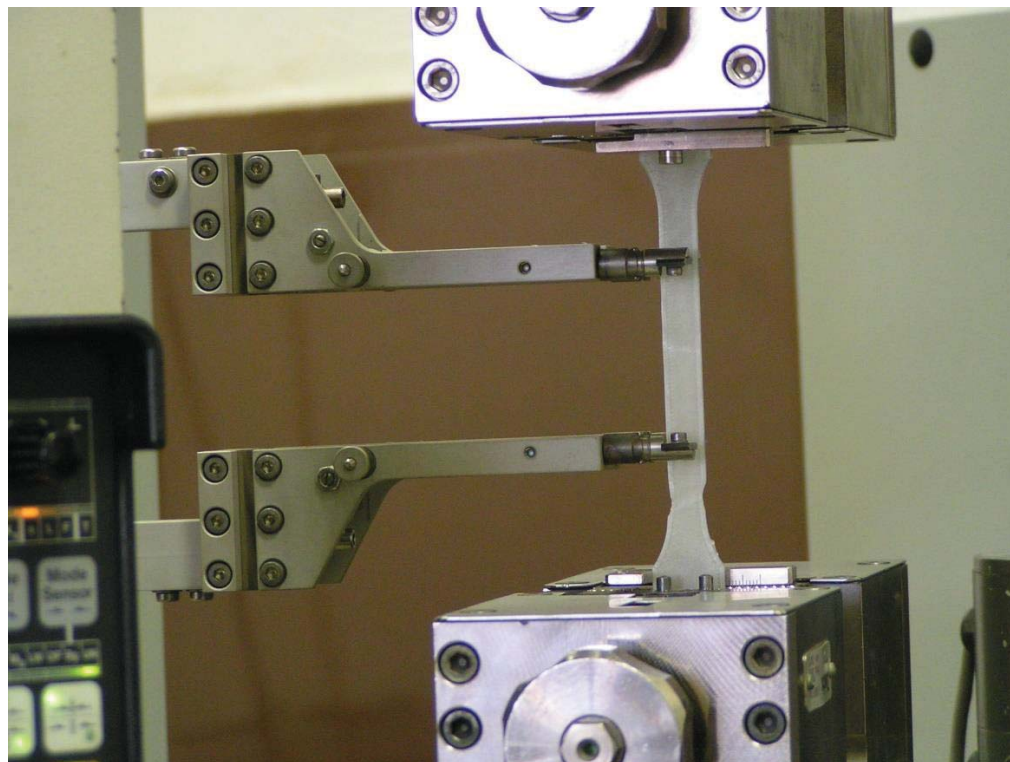
V následujícím sloupcovém grafu (obrázek 33) můžeme opět vidět porovnání mezi výrobci, tentokrát mezi jednotlivými moduly pružnosti v tahu. Značení a barevnost sloupců má stejný význam jako u minulého sloupcového grafu pro průměrnou pevnost v tahu.



Obrázek 33: Graf porovnávající modul mezi DD a PM



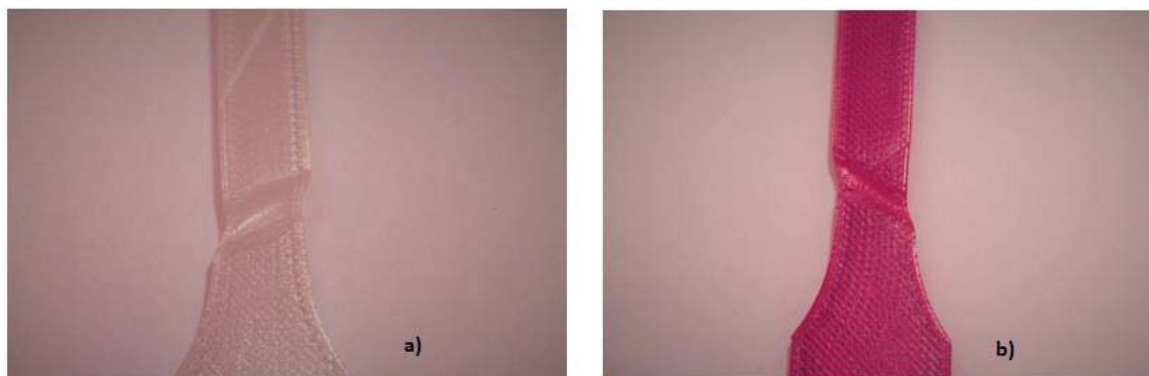
Obrázek 34: Tahová zkouška vzorku ze sady 7



Obrázek 35: Tahová zkouška - tvorba krčku

5.2. Natrhané vzorky

U vzorků tištěných s úhlem výplně 45° / -45° se při zkoušce tahem vytvořil tzv. krček. Krček se vytvořil pod úhlem 45° ve směru vláken, tedy ve skluzové rovině vzorku. Výjimkou byly vzorky modré od výrobce Plasty Mladeč (PM_BL_45x45_XY), u kterých došlo k přetržení, což nejspíš zapříčinil pigment, neboť na vzorcích bezbarvých od stejného výrobce se stejnými parametry tisku (PM_NAT_45x45_XY) se také vytvořil krček.



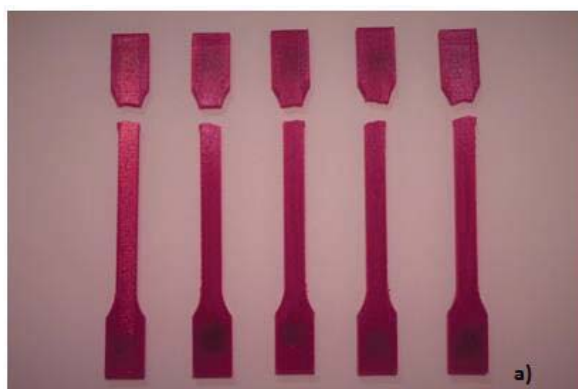
Obrázek 36: Vytvořený krček a) DD_NAT_45x45_XY b) DD_RR_45x45_XY

U všech ostatních vzorků, než jsou výše zmíněné, došlo k přetržení. U vzorků s úhlem výplně 0° / 90° a u vzorků s hexagonální výplní došlo k lomu pod úhlem 90° . Stejně tak u vzorků tištěných vertikálně v rovině XZ.



Obrázek 37: Natrhané vzorky se sady PM_BL_45x45_XZv

Lze pozorovat, že u malých vzorků došlo k přetržení v poloměru, který může působit jako koncentrátor napětí. V poloměru se natrhaly také vzorky tištěné v rovině XZ horizontálně, zde ale mohlo také mít vliv odstraňování podpor ze vzorků, neboť v těchto místech držely podpory nejpevněji.



Obrázek 38: Natrhané vzorky tištěné horizontálně v rovině XZ a) DD_RR_45x45_XZh
b) PM_BL_45x45_XZh

6. VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

6.1. Statistické zpracování

Výsledky měření byly statisticky zpracovány pomocí počítačového výpočtového programu MiniTab. Soubory dat musely být nejprve otestovány testem normality (Andersonův - Darlingův test). Andersonův - Darlingův test je založen na empirické distribuční funkci ($F_E(x)$). Umožňuje nám ověřovat nulovou hypotézu $H_0: F_E(x) = F_T(x)$ (data H_0 sledují normální rozdělení) proti alternativě $H_1: F_E(x) \neq F_T(x)$ (data H_1 nesledují normální rozdělení), kde $F_T(x)$ značíme distribuční funkci teoretického rozdělení, které je specifikované včetně svých parametrů. Jako vstupní hodnoty jsou uvažovány naměřené hodnoty (R_m , E) pro všechny sady vzorků. Výsledkem tohoto testu je p-hodnota $p(AD)$. P-hodnota, která vychází vždy v rozmezí $<0, 1>$, se dále porovnává s hladinou významnosti α , tím je hypotéza buď připsána, nebo zamítnuta. Čím je p-hodnota větší, tím větší je důkaz o připsání nulové hypotézy. Pro tento případ je použita hladina významnosti $\alpha = 0,05$. Bude-li tedy p-hodnota větší než α , testy sledují normální rozdělení, pokud tomu bude naopak, bude hypotéza zamítnuta. [27, 36]

Tabulka 9: Výsledky testu normality:

Sada vzorků č.	p(AD)	
	E	Rm
1	0,087	0,739
2	0,681	0,459
3	0,067	0,703
4	0,085	0,412
5	0,288	0,637
6	0,324	0,749
7	0,070	0,398
8	0,716	0,094
9	0,566	0,755
10	0,751	0,603
11	0,112	0,076
12	0,812	0,403

Všechny hodnoty p-hodnoty jsou větší než hodnota hladiny významnosti $\alpha = 0,05$, můžeme tedy předpokládat, že testy sledují normální rozdělení, proto můžeme dále pokračovat s parametrickými statistickými testy. Sady jsou na sobě vzájemně nezávislé, tedy jsou nepárové. Pro porovnání různých sad použijeme parametrický test Two Sample t-test, to je test shodnosti středních hodnot souborů. Výstup testu je vyjádřen p-hodnotou $p(2T)$. Výsledky jsou opět porovnány s hladinou významnosti α . Pokud jsou p-hodnoty větší než α , je stanovená hypotéza zamítnuta. Nejprve jsou porovnány sady vzorků mezi výrobci, dále vliv pigmentu u jednotlivých výrobců, poté sady s rozdílným rastrem a nakonec sady s rozdílnou orientací součástí při tisku.

Tabulka 10: Two Sample t-test - porovnání mezi výrobci:

		p(2T)	
Porovnávané sady vzorků		E	Rm
DD NAT 45x45 XY	PM NAT 45x45 XY	0	0
DD RR 45x45 XY	PM BL 45x45 XY	0	0,002
DD RR 45x45 XZh	PM BL 45x45 XZh	0	0,101
DD RR 45x45 XZv	PM BL 45x45 XZv	0,148	0,502
DD RR 0x90 XY	PM BL 0x90 XY	0,132	0,256
DD RR hex	PM BL hex	0,011	0,912

Tabulka 11: Two Sample t-test - porovnání pigmentu u jednotlivých výrobců:

		p(2T)	
Porovnávané sady vzorků		E	Rm
DD NAT 45x45 XY	DD RR 45x45 XY	0,147	0,029
PM NAT 45x45 XY	PM BL 45x45 XY	0,722	0,028

Tabulka 12: Two Sample t-test - vliv úhlu a tvaru výplně:

		p(2T)	
Porovnávané sady vzorků		E	Rm
DD RR 45x45 XY	DD RR 0x90 XY	0,001	0
DD RR 45x45 XY	DD RR hex	0	0
PM BL 45x45 XY	PM BL 0x90 XY	0,193	0,228
PM BL 45x45 XY	PM BL hex	0	0,001

Tabulka 13: Two Sample t-test - vliv orientace součásti při tisku:

		p(2T)	
Porovnávané sady vzorků		E	Rm
DD RR 45x45 XY	DD RR 45x45 XZh	0,210	0,001
DD RR 45x45 XY	DD RR 45x45 XZv	0,615	0
DD RR 45x45 XZh	DD RR 45x45 XZv	0,443	0,003
PM BL 45x45 XY	PM BL 45x45 XZh	0,756	0,555
PM BL 45x45 XY	PM BL 45x45 XZv	0,004	0
PM BL 45x45 XZh	PM BL 45x45 XZv	0,022	0

Sady, kde vycházejí p-hodnoty testu normality p(AD) malé ($\leq 0,1$), jsou dále porovnány i neparametrickým testem (Mann – Whitney test) vyjádřeným pomocí p-hodnoty p(MW). To je provedeno z důvodu malého počtu vzorků v sadě (5 vzorků), tudíž by mohl každý přidáný vzorek test normality ovlivnit. P-hodnota p(MW) je opět porovnána s hladinou významnosti α .

Tabulka 14: Mann-Whitney test - porovnání mezi výrobci:

		p(MW)	
Porovnávané sady vzorků		E	Rm
DD_NAT_45x45_XY	PM_NAT_45x45_XY	0,012	-
DD_RR_45x45_XY	PM_BL_45x45_XY	-	0,012
DD_RR_45x45_XZh	PM_BL_45x45_XZh	0,012	-
DD_RR_45x45_XZv	PM_BL_45x45_XZv	0,095	-
DD_RR_0x90_XY	PM_BL_0x90_XY	-	0,296

Tabulka 15: Mann-Whitney test - porovnání pigmentu:

		p(MW)	
Porovnávané sady vzorků		E	Rm
DD_NAT_45x45_XY	DD_RR_45x45_XY	0,296	-
PM_NAT_45x45_XY	PM_BL_45x45_XY	0,835	0,012

Tabulka 16: Mann-Whitney test - vliv úhu výplně:

		p(MW)	
Porovnávané sady vzorků		E	Rm
PM_BL_45x45_XY	PM_BL_0x90_XY	-	0,210

Tabulka 17: Mann-Whitney test - vliv orientace součásti při tisku:

		p(MW)	
Porovnávané sady vzorků		E	Rm
DD_RR_45x45_XY	DD_RR_45x45_XZh	0,144	-
DD_RR_45x45_XY	DD_RR_45x45_XZv	0,144	-
DD_RR_45x45_XZh	DD_RR_45x45_XZv	0,144	-
PM_BL_45x45_XY	PM_BL_45x45_XZh	-	0,835
PM_BL_45x45_XY	PM_BL_45x45_XZv	-	0,012

6.2. Zhodnocení výsledků

V následující tabulce (Tab. 14) jsou vypsány procentuální rozdíly středních hodnot pevnosti a modulu mezi porovnávanými sadami vzorků, u kterých nebyla vyvrácena statistická hypotéza.

Tabulka 18: Porovnání středních hodnot pevnosti a modulu pro dané sady vzorků:

		Δ (%)	
Sady vzorků – porovnání mezi výrobci		E	Rm
DD_NAT_45x45_XY	PM_NAT_45x45_XY	-21,1	-16,1
DD_RR_45x45_XY	PM_BL_45x45_XY	-17,2	-24,6
DD_RR_45x45_XZh	PM_BL_45x45_XZh	-21,1	-
DD_RR_hex	PM_BL_hex	-18,4	-
Sady vzorků – vliv pigmentu			
DD_NAT_45x45_XY	DD_RR_45x45_XY	-	-3,0
PM_NAT_45x45_XY	PM_BL_45x45_XY	-	-12,9
Sady vzorků – vliv úhlu a tvaru výplně			
DD_RR_45x45_XY	DD_RR_0x90_XY	-8,3	-11,7
DD_RR_45x45_XY	DD_RR_hex	-45,8	-56,3
PM_BL_45x45_XY	PM_BL_hex	-46,6	-41,6
Sady vzorků – vliv orientace součásti			
DD_RR_45x45_XY	DD_RR_45x45_XZh	-	-37,8
DD_RR_45x45_XY	DD_RR_45x45_XZv	-	-61,7
DD_RR_45x45_XZh	DD_RR_45x45_XZv	-	-38,4
PM_BL_45x45_XY	PM_BL_45x45_XZv	-11,8	-53,6
PM_BL_45x45_XZh	PM_BL_45x45_XZv	-10,8	-51,7

Z výsledků je zřejmé, že největší vliv na výslednou pevnost má orientace součásti při tisku. Nejvyšší hodnoty pevnosti v tahu s ohledem na orientaci součásti dosahují vzorky tištěné v rovině XY a nejnižší vzorky tištěné vertikálně v rovině XZ, které nedosahují ani 50 % hodnoty pevnosti v tahu vzorků tištěných v rovině XY. Dále pevnost v tahu výrazně ovlivňuje tvar výplně, kdy u vzorků s hexagonální výplní je pevnost daleko menší, zde ale hraje velkou roli procentuální výplň vzorků. Vzorky s hexagonální výplní jsou tištěny s 50 % hustotou výplně a je zde použito o 23 % méně materiálu než u ostatních vzorků se 100 % hustotou výplně. S ohledem na úhel výplně dosahují nejvyšší pevnosti vzorky s úhlem rastru 45° / -45°. Celkově dosahují lepších mechanických vlastností vzorky tištěné z materiálu od výrobce Devil Design. Můžeme vidět, že vzorky z materiálu od výrobce Devil Design dosahují jak vyšší pevnosti v tahu, tak i modulu pružnosti, a to přibližně o 20 % než je to u vzorků z materiálu od výrobce Plasty Mladeč. Na pevnost v tahu má také vliv pigment materiálu, vyšších hodnot pevnosti dosahují vzorky z materiálu bezbarvého.

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo stanovit mechanické vlastnosti plastových dílů realizovaných 3D tiskem FDM technologií, následné porovnání a zhodnocení výsledků. Pro tuto práci byl použit materiál PET-G, a to od výrobce Devil Design a výrobce Plasty Mladeč. Mechanické vlastnosti byly měřeny pomocí tahové zkoušky. Analyzovanými veličinami tedy byla pevnost v tahu a modul pružnosti. Tahovou zkouškou byl zjišťován vliv procesních parametrů při tisku, a to vliv rastrové orientace, tvar rastru a orientace součásti při tisku, dále vliv výrobce materiálu a vliv pigmentu. Ze zpracovaných výsledků měření je zřejmé, že výslednou pevnost v tahu nejvíce ovlivňuje orientace součásti při tisku, kdy součást stavěna horizontálně v rovině XY vykazovala více než dvojnásobnou pevnost v tahu než součást stavěna vertikálně v rovině XZ. U výrobce Devil Design byl zaznamenán vliv rastrové orientace, u vzorků stavěných s rastrem 45° / -45° byla o 12 % vyšší pevnost než u vzorků s rastrem 0° / 90° . U výrobce Plasty Mladeč vyšel tento vliv statisticky nevýznamný. Lepší mechanické vlastnosti byly naměřeny u vzorků z materiálu od výrobce Devil Design, kde pevnost v tahu i modul pružnosti vycházely přibližně o 20 % vyšší než u vzorků od výrobce Plasty Mladeč. Vliv pigmentu byl rozdílný dle výrobce, u materiálu bezbarvého od výrobce Devil Design vycházela pevnost v tahu o 3 % vyšší než u materiálu červeného, u výrobce Plasty Mladeč byl rozdíl mezi hodnotami pevnosti v tahu mezi bezbarvým a modrým materiálem téměř 13 %. Všechny cíle této bakalářské práce byly splněny.

ZDROJE:

- [1] Thermoplastics. *Polymers International* [online]. Australia, 2014 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://polymers.com.au/thermoplastics/>
- [2] Termoplast. *Wikipedie* [online]. 2017 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Termoplast>
- [3] Termoplasty - základní druhy. *Polymery* [online]. Code Creator, 2016, s. 18 [cit. 2017-05-09]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [4] PETG filament for 3D Printing: Explained & Compared. *All3DP: all about 3D printing* [online]. 2017 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <https://all3dp.com/petg-filament-3d-printing/>
- [5] PETG průměr 1,75 mm: plast pro 3D tisk. *Computer Laboratory* [online]. Copyright ©, 2017 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <https://www.clexpert.cz/3dtisk/plast/petg>
- [6] PETG. *Midland Plastics, Inc.: Innovations in Plastic Since 1945* [online]. New Berlin [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: http://www.midlandplastics.com/srtd_petg.htm
- [7] GRIPHEN. *Axom* [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: http://www.axom.cz/imgs/articles/25-2_Griphen___PETG.pdf
- [8] PETG. *Curbell plastics* [online]. Orchard Park, NY, 2017 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <https://www.curbellplastics.com/Research-Solutions/Materials/PETG>
- [9] Technologie 3D tisku. *PKmodel* [online]. Praha, 2006 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://pkmodel.cz/3dtisk.html>
- [10] FDM technologie (Fused Deposition Modeling). *3D inventor blog* [online]. 2016 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <https://www.inventor3dblog.cz/fdm-technologie/>
- [11] HAVELKA, O. Výroba montážních přípravků pomocí metody Fused Deposition Modeling. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 45 s.
- [12] Extrusion deposition: Fused Deposition Modeling (FDM). *Additive3d.com* [online]. 2016 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://www.additive3d.com/extrusion-deposition-fused-deposition-modeling-fdm/>
- [13] EP: Periferie - tiskárny. *Talmar* [online]. [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: http://talmar.masteride.cz/Modul_EP_pf/EP-vyuka12.html
- [14] 3D tiskárna. *3D-tisk.cz* [online]. Brno: Nová média, s. r. o., 2014 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/3d-tiskarna/>
- [15] FLASHFORGE Dreamer Dual Extrusion 3D Printer. *FLASHFORGE USA* [online]. 2015 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: [15] <http://www.flashforge-usa.com/shop/3d-printers/flashforge-dreamer-dual-extrusion-3d-printer.html>

-
- [16] 3D tiskové materiály - jak fungují. *3D tiskárny* [online]. [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <http://www.3dtiskarny.info/recenze/srovnani-3d-tiskovych-strun/>
- [17] Černý tiskový materiál PETG. *Vše pro 3D tisk* [online]. [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <https://www.vsepro3dtisk.cz/p/cerny-tiskovy-material-petg>
- [18] PET, PET-G, PET-G/CF. *Materialpro3d.cz* [online]. Brno, 2017 [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/pet-g/>
- [19] ČSN EN ISO 527-2. *Plasty - Stanovení tahových vlastností*. 2. vyd. Brusel, 2012.
- [20] KUMAR, Vinod a Debasish DUTTA. An assessment of data formats for layered manufacturing. *Advances in Engineering Software* [online]. 1997, **28**(3), 151-164 [cit. 2017-05-09]. DOI: 10.1016/S0965-9978(96)00050-6. ISSN 09659978. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0965997896000506>
- [21] Materiály pro 3D tisk. *FUTUR3D* [online]. Praha [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <https://www.futur3d.net/materialy-pro-3d-tisk>
- [22] What is the best type of plastic for my 3D printing application? *3D Matter* [online]. 2016 [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <http://my3dmatter.com/what-is-the-best-type-of-plastic-for-my-3d-printing-application/>
- [23] PLA. *Materialpro3d.cz* [online]. Brno, 2017 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/pla/>
- [24] ABS. *Materialpro3d.cz* [online]. Brno, 2017 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/abs/>
- [25] Print Quality Troubleshooting Guide. *Simplify 3D* [online]. 2015 [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/#print-not-sticking-to-the-bed>
- [26] Oozing filament. *3D Printing for Beginners* [online]. 2016 [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <http://3dprintingforbeginners.com/sony-dsc-725/>
- [27] VOSYNEK, P. *Analýza odezvových veličin kostní tkáně při mechanickém zatěžování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 98 s. Vedoucí dizertační práce Ing. Tomáš Návrát, Ph.D.
- [28] What is Design for Additive Manufacturing. *ENGINEERS rule: Technology for Design and Engineering* [online]. 2016 [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <http://www.engineersrule.com/design-additive-manufacturing/>
- [29] STL File Format for 3D Printing - Explained in Simple Terms. *All3DP: all about 3D printing* [online]. 2016 [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <https://all3dp.com/what-is-stl-file-format-extension-3d-printing/>

[30] ŽLEBEK, M. *Konstrukce 3D tiskárny pro materiály s vyšší pevností*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 85 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Daniel Koutný, Ph.D..

[31] AHN, S. H., M. MONTERO, D. ODELL, S. ROUNDY a P. K. WRIGHT. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*. 2002, **8**(4): 248-257. DOI: 10.1108/13552540210441166. ISSN 13552546. Dostupné také z: Go to ISI://WOS:000178077300006

[32] DURGUN, Ismail a Rukiye ERTAN. Experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost. *Rapid Prototyping Journal* [online]. 2014, **20**(3), 228-235 [cit. 2017-05-11]. DOI: 10.1108/RPJ-10-2012-0091. ISSN 1355-2546. Dostupné z: <http://www.emeraldinsight.com/doi/10.1108/RPJ-10-2012-0091>

[33] RAYEGANI, Farzad a Godfrey C. ONWUBOLU. Fused deposition modelling (FDM) process parameter prediction and optimization using group method for data handling (GMDH) and differential evolution (DE). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2014, **73**(1-4), 509-519 [cit. 2017-05-12]. DOI: 10.1007/s00170-014-5835-2. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-014-5835-2>

[34] DOWLING, Norman E. *Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue*. 4th ed. Boston: Pearson, c2013. ISBN 01-313-9506-8.

[35] MARTÍNEZ, J., J.L. DIÉGUEZ, E. ARES, A. PEREIRA, P. HERNÁNDEZ a J.A. PÉREZ. Comparative between FEM Models for FDM Parts and their Approach to a Real Mechanical Behaviour. *Procedia Engineering* [online]. 2013, **63**, 878-884 [cit. 2017-05-14]. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.230. ISSN 18777058. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705813014434>

[36] *Ověřování normality*. Brno, 2007.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka	Význam
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
ASA	Akrylonitril-styren-akryl
BL	Transparentní modrý materiál
CAD	Computer aided design
DD	Výrobce Devil Design
FDM	Fused Deposition Modeling
LCD	Liquid Crystall Display
LOM	Laminated Object Manufacturing
NAT	Transparentní bezbarvý materiál
NYLON	Obchodní název pro Polyamid
PA	Polyamid
PBT	Polybutylentereftalát
PC	Polykarbonát
PET	Polyetyléntereftalát
PET-G	Polyetyléntereftalát-glykol
PLA	Polyactic Acid
PM	Výrobce Plasty Mladeč
RP	Rapid Prototyping
RR	Transparentní rubínově červený materiál
SLA	Stereolitografie
SLS	Selective Laser Sintering
STL	Stereo Lithography, datový formát
UV	Ultrafialové záření
3D	Třídimenzionální

Veličina	Jednotka	Popis
d	[m]	Průměr
E	[Pa]	Modul pružnosti (Youngův modul)
F	[N]	Zatěžující síla
F_{\max}	[N]	Maximální zatěžující síla
$F_E(x)$	[-]	Empirická distribuční funkce
$F_T(x)$	[-]	Distribuční funkce teoretického rozdělení
$F_T(x)$	[-]	Distribuční funkce teoretického rozdělení
H_0	[-]	Nulová statistická hypotéza
H_1	[-]	Alternativní statistická hypotéza
L	[m]	Délka
Me	[-]	Medián
$p(AD)$	[-]	P-hodnota testu normality
$p(2T)$	[-]	P-hodnota Two Sample t-testu
$p(MW)$	[-]	P-hodnota Mann-Whitney testu
R_m	[Pa]	Pevnost v tahu
S	[m ²]	Obsah plochy
s	[-]	Směrodatná odchylka
T_g	[°C]	Teplota skelného přechodu
T_m	[°C]	Teplota tavení
\bar{x}	[-]	Aritmetický průměr
α	[-]	Hladina významnosti
α_L	[K ⁻¹]	Lineární smrštění
ε	[-]	Deformace
σ	[Pa]	Napětí v tahu
Δ	[%]	Procentuální rozdíl
ΔL	[m]	Změna délky

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Nanášení materiálu metodou FDM [12].....	19
Obrázek 2: Popis technologie FDM [13]	20
Obrázek 3: Tiskárna FLASHFORGE Dreamer [15]	21
Obrázek 4: Porovnání základních tiskových materiálů pro FDM tisk [22]	23
Obrázek 5: Tvoření vláken při 3D tisku [25]	24
Obrázek 6: Prosakování materiálu extruderem [26].....	25
Obrázek 7: Nekonzistentní extruze materiálu [25]	26
Obrázek 8: a) vrstvený kompozit s obousměrným uspořádáním vláken b) vrstvený jednosměrný kompozit (jako u FDM modelu) [35]	27
Obrázek 9: Pevnost v tahu v závislosti na směru výplně při překrytí 0 mm [30]	28
Obrázek 10: Pevnost v tahu v závislosti na směru výplně při překrytí 0,003 mm [30]	29
Obrázek 11: Různé úhly výplně při orientaci a) horizontální b) vertikální c) kolmé [32]	29
Obrázek 12: Výsledky tahové zkoušky pro dané vzorky a) modul pružnosti b) pevnost v tahu [32]	30
Obrázek 13: Nastavované parametry a) orientace součásti b) úhel výplně c) šířka výplně d) vzduchová mezera [30]	30
Obrázek 14: Deformace při tahové zkoušce tvárného kovu a) nezatížený vzorek b) při rovnoměrném prodlužování c) při zužování (tvorbě krčku) [34]	33
Obrázek 15: Tvar zkušebního tělesa [19]	34
Obrázek 16: Rozměry zkušebního tělesa [19]	34
Obrázek 17: Tvar malého zkušebního tělesa [19]	35
Obrázek 18: Rozměry malého zkušebního tělesa [19]	35
Obrázek 19: Orientace součásti a) XZ horizontálně b) XY horizontálně c) XZ vertikálně [28]36	36
Obrázek 20: Liniová výplň pod úhlem [45 ° / -45°] a [0° / 90°]	36
Obrázek 21: Hexagonální výplň	37
Obrázek 22: Vytvořený model vzorku v programu Autodesk Inventor	38
Obrázek 23: Model koule převeden do STL formátu [29]	39
Obrázek 24: GCODE soubor pro vzorky tištěné v rovině XY	40
Obrázek 25: GCODE soubor pro vzorky tištěné v rovině XZ.....	40
Obrázek 26: Vytvořené podpory u vzorku tištěného v rovině XZ horizontálně	41
Obrázek 27: Porovnání mezi liniovým a hexagonálním rastrem s 50 % hustotou výplně	41
Obrázek 28: Vytisknutá sada vzorků č. 6	42
Obrázek 29: Vytisknuté sady vzorků č. 9 a č. 10.....	42
Obrázek 30: Odstraňování podpor.....	43
Obrázek 31: řez vzorkem tištěného a) v rovině XY b) v rovině XY – detailnější pohled c) v rovině XZ horizontálně d) v rovině XZ horizontálně – detailnější pohled e) v rovině XZ vertikálně [32]	44
Obrázek 32: Graf porovnávající pevnost v tahu mezi DD a PM.....	46
Obrázek 33: Graf porovnávající modul mezi DD a PM.....	47
Obrázek 34: Tahová zkouška vzorku ze sady 7	48
Obrázek 35: Tahová zkouška - tvorba krčku.....	48
Obrázek 36: Vytvořený krček a) DD_NAT_45x45_XY b) DD_RR_45x45_XY	49
Obrázek 37: Natrhané vzorky ze sady PM_BL_45x45_XZv.....	49
Obrázek 38: Natrhané vzorky tištěné horizontálně v rovině XZ a) DD_RR_45x45_XZh b) PM_BL_45x45_XZh.....	50

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Stručný přehled vlastností tiskových materiálů: [30]	23
Tabulka 2: Výsledky experiment: [33]	31
Tabulka 3: Seznam tvořených vzorků:	37
Tabulka 4: Přehled spotřeby materiálu a doby tisku:	39
Tabulka 5: Počet tiskových vrstev	40
Tabulka 6: Aritmetický průměr, směrodatná odchylka, medián pro hodnoty pevnosti v tahu: 45	
Tabulka 7: Aritmetický průměr a medián pevnosti v tahu pro skutečné průřezové hodnoty: . 46	
Tabulka 8: Aritmetický průměr, směrodatná odchylka a medián pro hodnoty modulu:	47
Tabulka 9: Výsledky testu normality:	51
Tabulka 10: Two Sample t-test - porovnání mezi výrobci:	52
Tabulka 11: Two Sample t-test - porovnání pigmentu u jednotlivých výrobců:.....	52
Tabulka 12: Two Sample t-test - vliv úhlu a tvaru výplně:	52
Tabulka 13: Two Sample t-test - vliv orientace součásti při tisku:	52
Tabulka 14: Mann-Whitney test - porovnání mezi výrobci:	53
Tabulka 15: Mann-Whitney test - porovnání pigmentu:	53
Tabulka 16: Mann-Whitney test - vliv úhu výplně:	53
Tabulka 17: Mann-Whitney test - vliv orientace součásti při tisku:	53
Tabulka 18: Porovnání středních hodnot pevnosti a modulu pro dané sady vzorků:	54